



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

**Aplicación de los sistemas bio-  
electroquímicos en humedales  
construidos para la mejora del  
tratamiento de aguas residuales  
domésticas**

Trabajo realizado por:

**Alberto Fortuño Ibáñez**

Dirigido por:

**Jaume Puigagut Juárez**

Grado en:

**Ingeniería de Obras Públicas**

Barcelona, **Junio 2018**

DECA - Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE GRADO**





## RESUMEN

**Palabras clave:** humedal construido, pila microbiana, sistema bioelectroquímico.

Una de las alternativas a los sistemas de depuración convencionales son los humedales construidos (CW). El agua es depurada mediante microorganismos presentes y procesos de descontaminación naturales. Por lo tanto, no requieren de un suministro energético para la degradación de la materia orgánica (MO) ni productos químicos para su tratamiento.

Es cierto, que aunque representen una buena alternativa para el tratamiento del agua residual doméstica, las reacciones de descontaminación son más lentas que en un sistema de tratamiento convencional, y por lo tanto, requieren de mayor superficie. Por ello, mediante la operación de los humedales con sistemas bioelectroquímicos se podrían mejorar las eficiencias de tratamiento y así reducir la superficie requerida.

Trabajar con sistemas bioelectroquímicos consiste en incorporar al humedal un sistema que permita producir energía eléctrica a partir de la degradación de la materia orgánica e inorgánica utilizando bacterias como catalizadores; conocido como Pila de Combustible Microbiana (MFC). Los CW y las MFC son tecnologías compatibles ya que ambas tecnologías son dependientes de las acciones de las bacterias para eliminar los contaminantes de las aguas residuales. La unión de ambos sistemas es conocido como CW-MFC.

Las MFC sin membrana disponen de dos electrodos conectados entre ellos para el flujo de los electrones, creando así la energía. Requieren que el ánodo permanezca anaeróbico y que el cátodo se exponga al oxígeno. Dichas condiciones pueden desarrollarse de forma natural en los CWS. Por esta razón, la tendencia en los últimos años es mejorar la capacidad de tratamiento de las aguas residuales junto con la producción de energía eléctrica.

Esta investigación ha cuantificado la mejora del tratamiento de agua residual urbana en humedales de flujo horizontal subsuperficial incorporándoles MFC. Además, se ha medido la producción de energía eléctrica mediante la depuración de agua.

Los resultados obtenidos, señalan que los sistemas CW-MFC conectados suponen una mejora del 8%, 48% y 5% en la eliminación de MO, amonio y sólidos totales (SST) respectivamente, si los comparamos con los humedales convencionales. Además, su durabilidad a lo largo de las semanas es constante.

Se ha constatado que las diferencias entre un CW-MFC y un CW son mayores y significantes analizando el 1r tercio del sistema.

Además, la producción diaria media de las pilas microbianas ha sido de 50 W-día de energía eléctrica.



## SUMMARY

**Key Words:** constructed wetland, microbial fuel cell, bio electrochemical system.

Constructed Wetlands (CW) are one of the alternatives to waste water treatment conventional systems. The water is treated by means of present microorganisms and decontamination natural processes. Therefore, they do not need an energetic supply for the degradation of the organic matter (OM) or chemical products for their treatment.

CW represent a good alternative for domestic waste water treatment, but decontamination reactions are slower than in compared with conventional treatment system, and therefore, they need of major area. That is why, operating wetlands with bio electrochemical systems, treatment efficiencies might be improved, and therefore, the required surface could be reduced.

Working with bio electrochemical systems consists of incorporating into the wetland a system that allows to produce electric power from the degradation of the organic and inorganic matter using bacteria as catalysts; also known as Microbial Fuel cell (MFC). CW and MFC are compatible technologies since both technologies are dependent on the actions of the bacteria to eliminate waste water pollutants. The union of both systems is known as CW-MFC.

MFC without membrane have two electrodes connected to one another, in order to achieve the electrons flow, creating energy. They need the anode to remain anaerobic and the cathode to be exposed to the oxygen. The above mentioned conditions can be developed in a natural way in CW. For this reason, the trend during the last few years is to improve the waste water treatment capacity together with electric power production.

This investigation has quantified the improvement of urban waste water treatment in horizontal sub-superficial wetlands incorporating MFC. In addition, electric power production generated from waste water treatment has been measured in this study.

The obtained results indicate that CW-MFC connected systems suppose an improvement of 8 %, 48 % and 5 % in OM elimination, ammonium and total solids (TSS) respectively, if we compare them with conventional wetlands. In addition, their permanence throughout weeks is constant.

It has been proved that the differences between a CW-MFC and a CW are major and significant analyzing the first third of the system.

In addition, the daily average production of the microbial fuel cells has been of 50 W · day of electric power.



---

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi hermano, por ser la pila que da energía a mis días y el humedal que depura mis malos momentos.

A mi padre y a Cristina, por ser pilares en mi vida y el sustento de tantas enseñanzas.

Al DECA, por dejarme trabajar con un gran equipo como es el GEMMA y confiar en mí desde el primer día.

A Marco, Marta y Manuel, por enseñarme tanto sobre el maravilloso mundo de la depuración.

Y a mis yayos, Elias y Montserrat, por ser el vivo reflejo de la felicidad.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### RESUMEN / ABSTRACT

### ABREVIACIONES

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>14</b>
3.1	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS .....	14
3.2	LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS .....	15
3.2.1	<i>HUMEDAL SUPERFICIAL.....</i>	<i>16</i>
3.2.2	<i>HUMEDAL SUB-SUPERFICIAL .....</i>	<i>17</i>
3.2.2.1	<i>HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL.....</i>	<i>17</i>
3.2.2.2	<i>HUMEDAL FLUJO VERTICAL.....</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>COMPARACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS.....</i>	<i>18</i>
3.2.4	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS</i> <i>19</i>	
3.2.5	<i>ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES</i> <i>SUBSUPERFICIALES.....</i>	<i>20</i>
3.3	LAS PILAS MICROBIANAS .....	22
3.3.1	<i>ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA DE</i> <i>COMBUSTIBLE MICROBIANA.....</i>	<i>23</i>
3.3.2	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>DESEMPEÑO ELÉCTRICO Y RENDIMIENTO DE LAS MFC .....</i>	<i>24</i>
3.3.4	<i>CONDICIONES PARA CREAR LA MEJOR EFICIENCIA DE LAS MFC's</i> <i>26</i>	
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y METODOLOGÍA ADOPTADA .....</b>	<b>27</b>
4.1	DISEÑO GENERAL Y SISTEMA DE TRABAJO.....	27
4.1.1	<i>CAPTACIÓN DEL AGUA RESIDUAL HASTA SU ENTRADA EN LOS</i> <i>HUMEDALES .....</i>	<i>28</i>
4.1.2	<i>HUMEDALES CONSTRUIDOS .....</i>	<i>29</i>
4.1.3	<i>PILAS MICROBIANAS (MFC) .....</i>	<i>30</i>
4.2	CONDICIONES OPERACIONALES .....	32
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	32



4.3.1	METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE MUESTRAS DEL AGUA.....	33
4.3.2	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) .....	33
4.3.3	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO <sub>5</sub> ).....	35
4.3.4	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE AMONIO PRESENTE .....	37
4.3.5	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN .....	39
4.3.6	RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DEL SISTEMA .....	40
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
5.1	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE EL RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN .....	41
5.1.1	%ELIMINACIÓN MO .....	41
5.1.2	% ELIMINACIÓN AMONIO.....	43
5.1.3	%ELIMINACIÓN DE SST .....	45
5.2	EFICIENCIA COULOMBICA.....	46
5.3	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
6.1	CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 1 DEL ESTUDIO	48
6.1.1	%ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.....	48
6.1.2	% ELIMINACIÓN DE AMONIO.....	49
6.1.3	% ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES .....	50
6.2	CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 2 DEL ESTUDIO	50
6.3	CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 3 DEL ESTUDIO	50
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## ANEJO 1. PARÁMETROS FÍSICOS ESTUDIADOS PARA EL CONTROL Y BUEN FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Humedal natural del Empordà. Fuente: <a href="http://www.geoenciclopedia.com">www.geoenciclopedia.com</a> . ....	15
Figura 3.2.2. Colocación de geomembrana en humedal contruido. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA .....	16
Figura 3.2.3. Humedal superficial. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA .....	16
Figura 3.2.4. Humedal sub-superficial. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA .....	17
Figura 3.2.5. Humedal sub-superficial de flujo horizontal. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA.....	17
Figura 3.2.6. Humedal sub-superficial de flujo vertical. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA.....	18
Figura 3.2.7. MES según la distancia a la entrada del humedal (García & Corzo, 2008) .....	20
Figura 3.2.8. Mineralización de la MO en un humedal. Fuente: DEHMA.....	21
Figura 3.2.9. Esquema general de la nitrificación-desnitrificación. Fuente: DEHMA ...	22
Figura 3.2.10. Detalles principales de una MFC con separador entre cámaras (Revelo & Hurtado & Ruiz, 2013) .....	23
Figura 4.11. Sistemas en el laboratorio del DECA. Fuente: Imagen cedida por el GEMMA .....	27
Figura 4.12. Bomba peristáltica Damova MP-3035-6M utilizada .....	28
Figura 4.13. Tanque de reposo utilizado en el laboratorio del DECA .....	29
Figura 4.14. Registrador de datos utilizado. Imagen cedida por el GEMMA.....	31
Figura 4.15. Sección (arriba) y vista en planta (abajo) de los sistemas CW-MFC. (Imagen cedida por Dr. Marco Hartl).....	32
Figura 4.16. Bloque digestor con control de T <sup>a</sup> y tiempo .....	34
Figura 4.17. Color de muestra según la materia orgánica. Fuente: DEHMA .....	35
Figura 4.18. Botellas con sensor VELD para la medición de DBO .....	37
Figura 4.19. Espectrofotómetro GENSYS 8 utilizado .....	39
Figura 4.20. Esquema general de la materia sólida (DEHMA) .....	40
Figura 4.21. Estufa (105°C) .....	40
Figura 5.22. % de eliminación de la MO en función del tipo de sistema .....	41
Figura 5.23. Diferencia de DQO entre los puntos de muestreo .....	42
Figura 5.24. Rendimiento de eliminación de la MO entre los puntos de muestreo .....	42





---

Figura 5.25. % de eliminación a lo largo de las semanas.....	43
Figura 5.26. % de eliminación del amonio en función del tipo de sistema .....	43
Figura 5.27. Amonio eliminado entre los puntos de muestreo.....	44
Figura 5.28. Amonio eliminado entre los puntos de muestreo.....	44
Figura 5.29. Amonio eliminado a lo largo de las semanas .....	45
Figura 5.30. SST a la salida de los sistemas .....	45
Figura 5.31. Eficiencia Coulómbica a lo largo de las semanas de las MFC (CC) .....	46
Figura 5.32. Energía generada (W·h) mediante la depuración de agua .....	47
Figura 5.33. Tendencia de flujo del agua .....	49



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Valores típicos ARU. Fuente: DEHMA. ....	15
Tabla 3.2: Comparativa de humedales según la lámina de agua .....	18
Tabla 3.3: Comparativa de humedales según el flujo de agua .....	19
Tabla 3.4: Ventajas e inconvenientes de los humedales construidos.....	19
Tabla 4.5: Dimensiones y elementos del humedal .....	30
Tabla 4.6: Volumen de muestra a estudiar según la DBO esperada. Fuente: Manual de técnicas analíticas .....	37



---

## ABREVIACIONES

**ARU:** Aguas Residuales Urbanas

**CHS:** Carga Hidráulica Superficial

**CMS:** Carga Másica Superficial

**COV:** Carga Orgánica Volumétrica

**CW:** Humedal Construido (Constructed Wetland)

**CW-MFC:** Humedal construido con Pila Microbiana

**DBO<sub>5</sub>:** Demanda Bioquímica de Oxígeno

**DECA:** Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**DEHMA:** Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental

**DO:** Oxígeno disuelto

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**GEMMA:** Grupo de Ingeniería y Microbiología del Medio Ambiente

**MD:** Materia Disuelta

**MES:** Materia en Suspensión

**MFC:** Pila de Combustible Microbiana (Microbial Fuel Cell)

**MI:** Materia Inorgánica

**MO:** Materia Orgánica

**SST:** Sólidos Totales en Suspensión

**SSV:** Sólidos Volátiles

**TRH:** Tiempo de Retención Hidráulico



## 1 INTRODUCCIÓN

En el año 2017, Naciones Unidas informó que la población mundial actual de 7.600 millones de personas alcanzará los 8.600 millones para el año 2030. Eso significa que el ritmo de crecimiento será de aproximadamente 77 millones de personas más cada año. Las principales causas del incremento poblacional a lo largo de los años han sido gracias a factores como la disminución de la tasa de mortalidad a lo largo de los años fruto de la producción y distribución de los alimentos, el mejoramiento de la higiene, y los avances en la medicina.

Este aumento de la población, ha hecho emerger dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. El agua es un recurso escaso pero fundamental para los seres vivos, y tanto la energía como el agua suponen un aspecto importante en la actividad económica de cualquier región. Difícilmente se conseguirá el objetivo de mantener la calidad y la cantidad del agua sin optimizar su uso y consumo; dándole aplicaciones sucesivas; y sin apostar por energías renovables.

Es por ello que en la última década, la comunidad científica y de ingenieros se están esforzando en investigar alternativas a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas, intentando establecer una economía verdaderamente cíclica.

En particular, la depuración del agua residual juega un papel importante en ambas problemáticas. Los llamados sistemas de “bajo coste” o “blandos” se proponen como nuevas opciones para el tratamiento de agua. Estos se basan en depuración natural, es decir, la velocidad de depuración tiene lugar al ritmo natural del medio. Esto nos permite un bajo suministro de energía; a diferencia del reactor biológico; y pocos mecanismos, pero la necesidad de una gran superficie para llegar al mismo grado de depuración que un sistema convencional.

Los humedales contruidos han sido interés de estudio en los últimos años, como sistemas de “bajo coste”. Son el modelo que se basa en reproducir las características de los humedales naturales a la vez que mejoran la capacidad de tratamiento forzando las diferentes variables que supone la depuración del agua residual.

Si a estos sistemas se les incorpora las llamadas pilas microbianas (MFC, Microbial Fuel Cells), conseguiremos optimizar el tratamiento de agua y obtendremos energía eléctrica a la vez que depuramos. En los últimos diez años, esta unificación se ha estudiado ampliamente en todo el mundo para extraer energía de las aguas residuales a través de la generación de electricidad, lo que se conoce como CW-MFC.

A pesar de los grandes avances tecnológicos, aún quedan muchos campos por tratar y seguir explorando las ventajas y limitaciones por superar de estos sistemas.

El principal objetivo de este trabajo, es cuantificar la mejora que supone la incorporación de una pila microbiana en un humedal contruido. Se pretende ofrecer un análisis del desarrollo de CW-MFC y maximizar la producción eléctrica así como la eficiencia con la unión de ambos sistemas.



## 2 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesina es evaluar la eficiencia de tratamiento de agua residual urbana en humedales artificiales operados como sistemas bioelectroquímicos.

Para poder cuantificar y extraer conclusiones, se han marcado los siguientes objetivos específicos que se desarrollarán a lo largo del trabajo:

- 1) Evaluar y comparar la degradación de materia orgánica (MO), amonio y sólidos totales (SST) entre humedales con pilas microbianas activas (circuito cerrado), humedales con pilas microbianas no activas (circuito abierto) y humedales contruidos.
- 2) Comprobar la durabilidad de las pilas conectadas a lo largo del tiempo mediante su eficiencia coulombica.
- 3) Medir la producción eléctrica diaria en pilas activas (circuito cerrado).



### 3 ESTADO DEL ARTE

Para poner en contexto, se describirán todos aquellos conceptos clave para que el lector pueda comprender de la mejor manera el desarrollo de la tesina. Entre todos los capítulos se podrán distinguir dos grandes grupos: los humedales construidos y las pilas microbianas. En ambos apartados se numeraran las ventajas y desventajas que se obtienen con su uso, y otros aspectos relacionados con la presente investigación.

#### 3.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

La composición de las Aguas Residuales Urbanas (ARU) es muy variada, son la mezcla de las aguas domésticas; generadas por el metabolismo humano y las actividades domésticas; con el agua de lluvia.

Es por ello que supone un gran reto disminuir o eliminar todos aquellos componentes que puedan ser perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Se pueden agrupar en los siguientes grupos:

- **MATERIA SÓLIDA**
  - Tipos según la naturaleza de las partículas: Materia Inorgánica (MI); de composición mineral; o Materia Orgánica (MO); contenido de sólidos volátiles.
  - Tipos según el tamaño de las partículas: Materia Disuelta (MD); nivel atómico que podemos filtrar; o Sólidos en Suspensión (SS); tamaño inferior al atómico que no podemos filtrar.
- **NUTRIENTES**: Los seres humanos producimos por persona 6 kg de nitrógeno y 1 kg de fósforo anualmente. 500 m<sup>2</sup> de tierra cultivada pueden soportar el 75% de las necesidades nutricionales de una persona (Richert & Gensch & Jönsson 2012).
  - Nitrógeno: Procedente de la urea que expulsamos con la orina y la materia fecal, pasando posteriormente a forma amoniacal por descomposición bacteriana. Este proceso se conoce como mineralización de la MO. Un exceso de nitrógeno contribuye al agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas. En las aguas residuales el nitrógeno se encuentra en 4 formas básicas: nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato.
  - Fósforo: Procedente en gran medida de los detergentes. En el agua residual el fósforo se encuentra en 3 formas: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos.
- **PATÓGENOS**: Todos aquellos agentes que pueden producir una enfermedad o daño; los más característicos son los E.Coli y Enterovirus. La eliminación o reducción de la concentración de microorganismos fecales es imprescindible para garantizar buenas condiciones sanitarias.

- **CONTAMINANTES EMERGENTES:** Productos farmacéuticos, plaguicidas y otras sustancias contaminantes.

Mediante el análisis de muestreos, se pueden caracterizar las aguas. Los parámetros y valores típicos en las aguas residuales urbanas sin tratar se pueden ver en la **tabla 3.1**.

Tabla 3.1: Valores típicos ARU. Fuente: DEHMA.

Composició ARU:

Paràmetre	Unitats	Valor	
MES	mg/L	200-500	Sòlids
DBO <sub>5</sub>	mg/L	200-500	
DQO	Mg/L	250-700	Matèria orgànica
Nitrogen	mg/L	40-60	Nutrients
Fòsfor	mg/L	7-15	
<i>E. coli</i>	UFC/100 mL	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>	Patògens
Enterovirus	UFC/100 mL	1-10	
Tensioactius	mg/L	1-10	Contaminats emergents
Productes farmacèutics			

## 3.2 LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

Se podría definir un humedal natural como aquella zona donde la superficie del suelo se cubre de agua de forma permanente o estacional; tanto si el agua es dulce, salada o salobre (**Figura 3.2.1**).



Figura 3.2.1. Humedal natural del Empordà. Fuente: [www.geoenciclopedia.com](http://www.geoenciclopedia.com).

Pero no todo suelo que se llena de agua es considerado un humedal. Para ello, el agua ha de perdurar durante un período de tiempo suficiente para que el suelo se sature, quedando desprovisto de oxígeno, dando lugar a un ecosistema híbrido entre el medio acuático y terrestre.



La reproducción y construcción del hombre de estas zonas naturales, se les llama humedales contruidos o artificiales. El objetivo de estas zonas se basa en el tratado de aguas residuales, asegurando la decantación de la materia en suspensión (MES) y la mineralización de la materia orgánica (MO).

Se diferencian dos tipos de humedales contruidos según la lámina de agua: los superficiales y los sub-superficiales. Ambos llevan instalada una geomembrana que cubre la totalidad del suelo para impermeabilizar y evitar pérdidas de agua al subsuelo. La geomembrana o geotextil imitan al suelo saturado del humedal natural. En la imagen de la **figura 3.2.2.** puede verse su colocación.



Figura 3.2.2. Colocación de geomembrana en humedal contruido. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA

### 3.2.1 HUMEDAL SUPERFICIAL

La característica básica de este tipo de humedal es que la lámina de agua es visible y está en contacto con la atmósfera. Por lo tanto el metabolismo del sistema será aerobio (existencia de oxígeno en el medio), dado que su profundidad no será superior a los 60 cm. En la **Figura 3.2.3.** se puede observar un humedal superficial real.



Figura 3.2.3. Humedal superficial. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA



### 3.2.2 HUMEDAL SUB-SUPERFICIAL

Esta tipología es la más usada debido a que la lámina de agua fluye por debajo del material granular (gravas) entre las rizomas y raíces de las plantas. Esto proporciona que el metabolismo del sistema sea anaerobio (exento de oxígeno). Según el flujo del agua se diferencian dos tipos de humedal sub-superficial: de flujo horizontal y de flujo vertical.



Figura 3.2.4. Humedal sub-superficial. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA

#### 3.2.2.1 HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL

El agua fluye de manera horizontal a lo largo del humedal y el medio granular funciona permanentemente inundado. El agua se encuentra a 5-10 cm bajo la superficie.

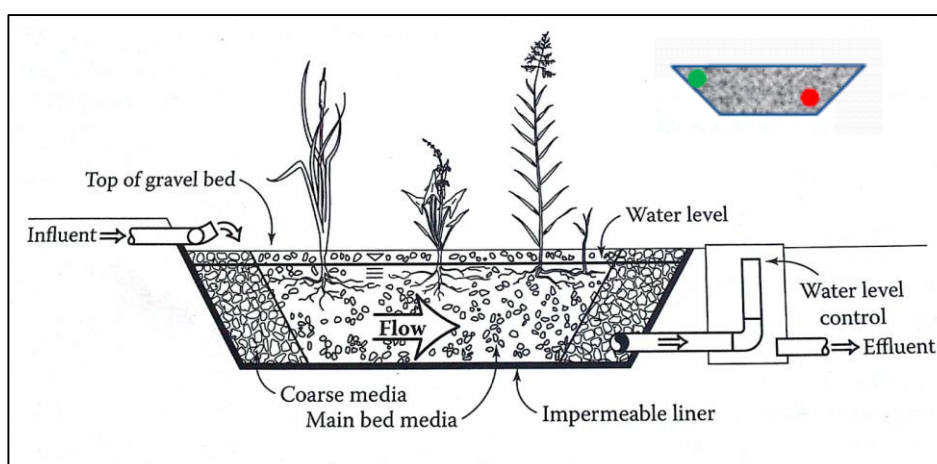


Figura 3.2.5. Humedal sub-superficial de flujo horizontal. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA

### 3.2.2.2 HUMEDAL FLUJO VERTICAL

El agua atraviesa diferentes capas de grava mediante gravedad hasta su salida del humedal. El agua entra de forma intermitente, a diferencia de los de flujo horizontal que el medio granular está permanentemente inundado.

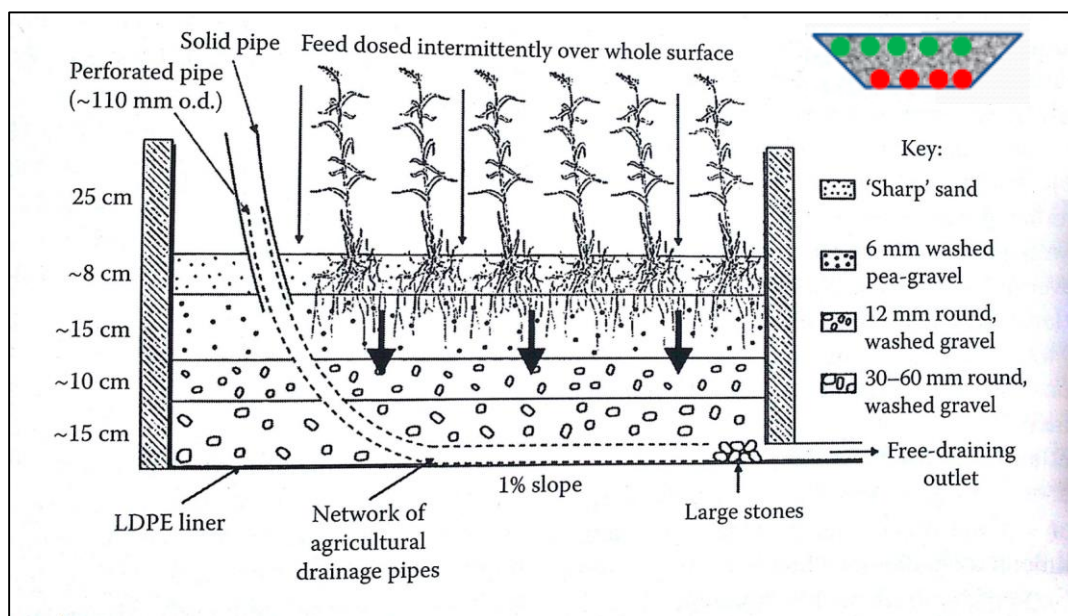


Figura 3.2.6. Humedal sub-superficial de flujo vertical. Fuente: Imagen cedida por el DEHMA

### 3.2.3 COMPARACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Se presentan las diferencias más importantes entre ambos sistemas: según la lámina de agua en la **tabla 3.2.** y según el flujo agua en la **tabla 3.3.**

Tabla 3.2: Comparativa de humedales según la lámina de agua

	SUPERFICIAL	SUB-SUPERFICIAL
TRATAMIENTOS PREVIOS	SECUNDARIO*	PRIMARIO**
OBJETIVOS	DEPURACIÓN (TERCIARIO)	DEPURACIÓN (SECUNDARIO)
VALOR ECOLÓGICO	MAYOR (fauna puede acceder al agua)	MENOR
METABOLISMO	AEROBIO	ANAEROBIO
OLOR	CONTROLADO (en el caso que se dé)	NO
PRESENCIA DE INSECTOS	CONTROLADO	NO



	SUPERFICIAL	SUB-SUPERFICIAL
TEMPERATURA	AFECCIÓN DE LAS BAJAS TEMPERATURAS	CONSTANTE
COSTE	MENOR	MAYOR (debido al material granular)

\*Requiere de una calidad de agua entrante buena, es el más parecido a un humedal natural.

\*\*Requiere un pre-tratamiento mínimo para eliminar la MES y evitar la colmatación.

Tabla 3.3: Comparativa de humedales según el flujo de agua

	HORIZONTAL	VERTICAL
FUNCIONAMIENTO	CONTINUO	DISCONTINUO
CARGA MÁSCA SUPERFICIAL	5 m <sup>2</sup> /H.E. (10 para nitrificar)	2 m <sup>2</sup> /H.E. (no nitrificación)
CARGA MÁSCA SUPERFICIAL *	4-6 g/m <sup>2</sup> *d	20-40 g/m <sup>2</sup> *d
OPERACIÓN	Sencilla	Más compleja

\* Carga Máscica Superficial (CMS) = Medida de la capacidad de depuración del humedal (**ecuación 1**):

$$CMS = \frac{\text{Caudal (V/T)} \cdot \text{DBO5 (mg O}_2\text{/l)}}{\text{Superficie horizontal (l2)}} \quad [1]$$

### 3.2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los sistemas depurativos de bajo coste presentan ventajas e inconvenientes que deben tenerse en cuenta antes de su implantación.

Toda la investigación de esta tesina ha sido realizada para un humedal construido sub-superficial de flujo horizontal, por lo tanto nos centraremos en sus ventajas e inconvenientes más destacados mostrados en la **tabla 3.4**.

Tabla 3.4: Ventajas e inconvenientes de los humedales construidos

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Simplicidad en la operación (<1 hora operario/día)	Gran superficie ocupada
Consumo energético nulo/mínimo	Larga puesta en marcha (varios meses)

Baja producción de residuos sólidos/fangos	Pocos factores de control de eficiencia
Bajo coste de explotación y mantenimiento (24.000-30.000 euros/año)*	Alto coste inicial de movimiento de tierras
Bajo impacto ambiental (tanto paisajístico como sonoro)	Los humedales de flujo sub-superficial son susceptibles a la colmatación*
Creación y restauración de zonas húmedas	

\*La colmatación produce malos olores, disminuye la eficiencia y aumenta los costes de gestión.

### 3.2.5 ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES SUBSUPERFICIALES

Los mecanismos involucrados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas, mediante el empleo de humedales subsuperficiales son:

- Eliminación de sólidos en suspensión mediante procesos de sedimentación, floculación y filtración mediante gravas. Su rendimiento suele ser muy elevado, llegando al 90% de eliminación de la materia en suspensión (MES) y produciendo efluentes con concentraciones menores a 20 mg/l (García&Corzo, 2008). La mayor parte de la MES; por encima del 50%; es eliminada en el primer tercio del humedal como se puede apreciar en la **figura 3.2.5.1**. La elección del tamaño granular es importante para el buen funcionamiento del humedal. El medio granular debe ser de un tamaño suficientemente pequeño para permitir la entrada y salida de agua con facilidad, y a la vez garantizar una buena filtración del agua. Para ello, los materiales graníticos de 5-6 mm de diámetro ofrecen buenos resultados (García&Corzo, 2008).

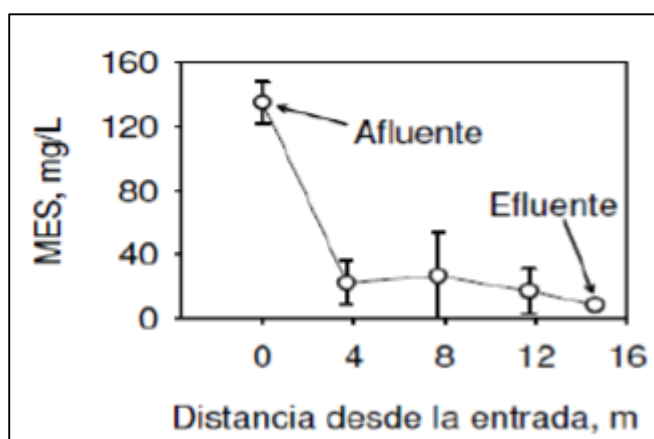


Figura 3.2.7. MES según la distancia a la entrada del humedal (García & Corzo, 2008)

- Eliminación de materia orgánica mediante los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizan esta materia orgánica como sustrato; conocidas como bacterias heterótrofas. En el humedal existen zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios como anaerobios en muchos de los casos.
- Eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, principalmente mediante mecanismos de nitrificación-desnitrificación y precipitación.
  - Nitrógeno: El nitrógeno orgánico presente en el agua, es fácilmente transformado por las bacterias en amonio al entrar en el humedal mediante la mineralización del nitrógeno contenido de los orgánicos (**Figura 3.2.8**).

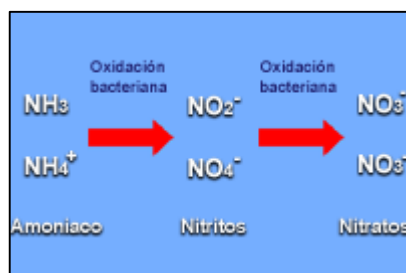
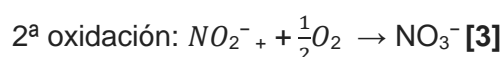
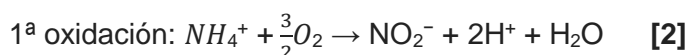
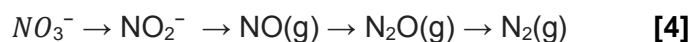


Figura 3.2.8. Mineralización de la MO en un humedal. Fuente: DEHMA

Posteriormente a este proceso de amonificación, le sigue la nitrificación, que requiere de exclusivamente condiciones aeróbicas. La nitrificación se produce en dos etapas: una primera etapa donde las bacterias *Nitrosomes* transforman el amonio en nitrito (**ecuación 2**), y una segunda etapa donde las bacterias *Nitrobacter* transforman el nitrito en nitrato (**ecuación 3**).



La desnitrificación es el última paso para la eliminación del nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas (sin oxígeno disuelto) (**ecuación 4**).



Los tres productos de la reacción forman gas que se pierde en la atmósfera. En humedales horizontales es difícil la eliminación del amonio dado que no se dispone de muchas zonas aerobia y por lo tanto la transferencia de oxígeno es baja.



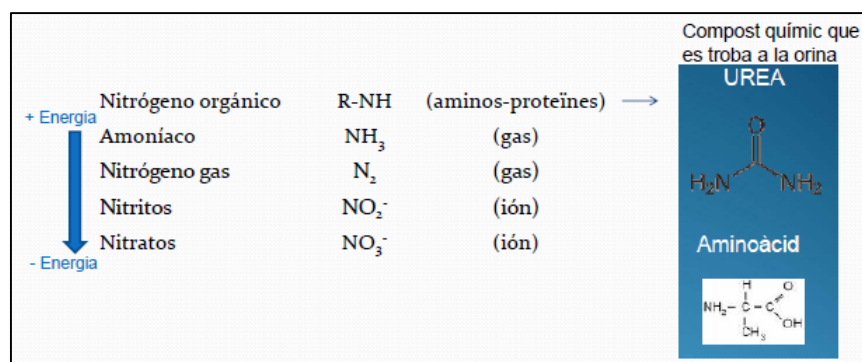


Figura 3.2.9. Esquema general de la nitrificación-desnitrificación. Fuente: DEHMA

- **Fósforo:** La mayor parte de la eliminación del fósforo se realiza mediante la asimilación de los microorganismos presentes en el humedal y por sedimentación, adsorción e intercambios entre el suelo y el agua residual circulante.

La eliminación del fósforo se cumple, siendo el porcentaje de eliminación cercano al 10-20% del fósforo inicial. Un porcentaje muy similar al logrado con los sistemas convencionales de depuración (*García y Corzo, 2008*).

- Eliminación de algunos patógenos mediante adsorción y filtración. En humedales de flujo subsuperficial el tiempo de permanencia hidráulico (TPH) del agua y el diámetro de la grava son un factor clave. A mayor TPH y menor diámetro de grava mayor es el nivel de eliminación.
- Eliminación de metales pesados como cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, selenio, plomo, etc. A día de hoy no se dispone de suficientes datos para conocer a ciencia cierta los mecanismos de eliminación de este tipo de contaminantes.

(*Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables (REMTAVARES)*)

### 3.3 LAS PILAS MICROBIANAS

Las pilas microbianas (Microbial Fuel Cells) son dispositivos que permiten la generación de energía eléctrica mediante la degradación de materia orgánica e inorgánica presente en el agua. Esto es posible, cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno), y fluyen hacia el cátodo unido por un material conductor. Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Pant et al., 2010).

Las MFC se distinguen de otros sistemas de generación de energía porque: operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a muy bajas temperaturas; producen menor cantidad de CO<sub>2</sub> que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía, por lo que las pocas emisiones de este gas no requieren ningún tipo de tratamiento; no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo sea aireado; y en el futuro podrían ser utilizadas en lugares remotos donde haya demanda de consumos básicos de energía eléctrica (Rabaey et al., 2003, Du et al., 2007, Pant et al., 2010).

### 3.3.1 ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Las MFC típicamente están compuestas por dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica (Min et al., 2005), en medio de las cuales hay un separador. La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y  $\text{CO}_2$ . En cada una de las cámaras se coloca un electrodo, el ánodo en la cámara anaeróbica y el cátodo en la cámara aeróbica (Du et al., 2007). Una vez los electrones se liberan en la cámara anódica, éstos son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo (Li et al., 2011).

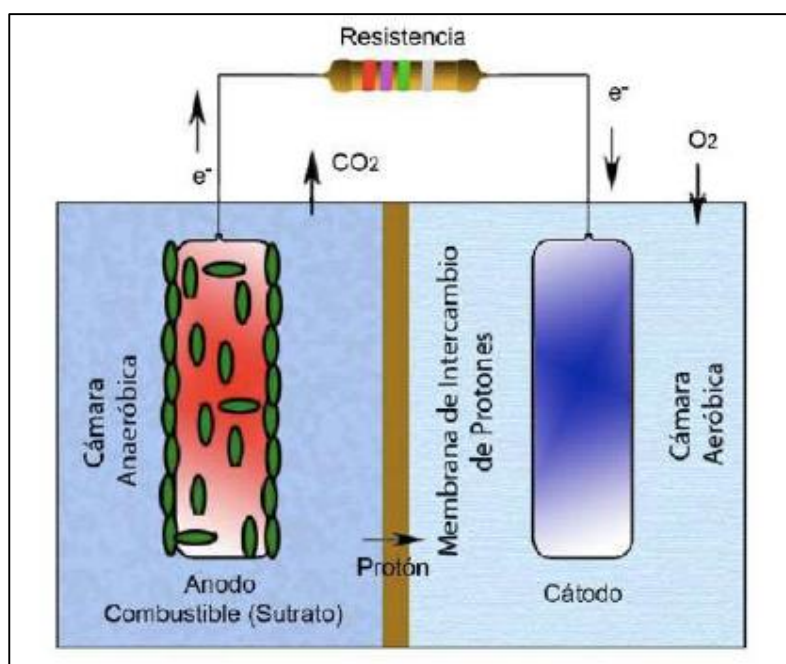


Figura 3.2.10. Detalles principales de una MFC con separador entre cámaras (Revelo & Hurtado & Ruiz, 2013)

El separador; habitualmente fabricado de fibra de vidrio (Li et al., 2011); impide el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y deja pasar los protones.

La variante que se ha utilizado en esta tesina, es la llamada MFC de una sola cámara. Se obtiene eliminando la cámara catódica y exponiendo el cátodo directamente al aire. Este hecho hace que sea un sistema mucho más sencillo y de menor coste (Du et al., 2007). Además este tipo de pilas pueden prescindir de separador; cómo en este caso; dado que en el humedal ya existe una zona anaerobia y una zona aerobia.



### 3.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La utilización de MFC's para la depuración del agua, supone un gran reto a la comunidad científica para ser una práctica competente a gran escala. Para ello, han de estudiarse las ventajas y desventajas que supone su uso:

➤ **VENTAJAS:**

- Operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a muy bajas temperaturas (por debajo de los 20 °C).
- Producen menor cantidad de CO<sub>2</sub> que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía, por lo tanto no necesitan tratamiento posterior de los gases producidos.
- No necesitan aporte de energía siempre que el cátodo esté en contacto con el aire.
- En el futuro podrían ser utilizadas en lugares remotos donde haya demanda de consumos básicos de energía eléctrica, dado que obtienen energía directamente a partir de un sustrato biodegradable.
- Método silencioso, que podría utilizarse en zonas urbanas.

➤ **DESVENTAJAS:**

- Los materiales con los que ha sido estudiada suponen un elevado coste a gran escala y por lo tanto existe polémica sobre su viabilidad económica.
- Actualmente, no se disponen de estudios a largo plazo sobre la durabilidad de los materiales.
- A día de hoy, una de sus grandes limitaciones es la baja producción de energía.

### 3.3.3 DESEMPEÑO ELÉCTRICO Y RENDIMIENTO DE LAS MFC

El funcionamiento de una pila MFC es relativamente sencillo, y está basado en el principio de reducción-oxidación. Básicamente son sistemas electroquímicos que transforman la energía química en eléctrica. A diferencia de una pila convencional, las pilas de combustible microbianas no se acaban ni han de ser recargadas mientras se le suministre sustrato de forma continua.

El rendimiento de una pila de combustible microbiana debe evaluarse tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas. A partir del voltaje teórico ( $E_{pila}$ ) se puede determinar la intensidad, la potencia y la eficiencia coulombica de las pilas (Hernández et al., 2010). Dicho voltaje se define como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo (**ecuación 5**) expresada en voltios (V).

$$E_{pila} = E_{Cátodo} - E_{Ánodo} \quad [5]$$

Por tanto el desempeño eléctrico de una MFC se estudia a partir de las mediciones de voltaje periódicas que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo y los respectivos cálculos que se derivan de ellas (Revelo & Hurtado & Ruiz, 2013).





Los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de dispositivos son: la densidad de potencia, la eficiencia coulombica (Rismani-Yazdy et al., 2011) y la resistencia interna (Borole et al., 2009).

La densidad de potencia teórica expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang et al., 2010) se calcula como (**ecuación 6**):

$$P_A = \frac{I \cdot E_{pila}}{A_{anodo}} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad [6]$$

Donde,  $I$  es la corriente,  $E_{pila}$  el potencial teórico y  $A_{anodo}$ , el área de la superficie del electrodo anódico.

La intensidad ( $I$ ) se mide a través de una resistencia externa ( $R_{ext}$ ) donde el corriente se calcula a partir de la ley de Ohm (**ecuación 7**):

$$I = \frac{E_{pila}}{R_{ext}} \text{ (A)} \quad [7]$$

La eficiencia coulombica es el parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica generada a partir de un sustrato determinado. Se define como la relación entre el número de coulombios reales transferidos del sustrato al ánodo y el número máximo posible teórico si todo el sustrato fuera capaz de producir corriente (**ecuación 8**).

Su medición es importante ya que permite la comparación del desempeño de diferentes MFC's.

$$EC\% = \frac{E_{pila,i} \cdot t_i}{R_{ext} \cdot F \cdot b \cdot S \cdot V} \cdot M \cdot 100 \quad [8]$$

Donde,  $E_{pila,i}$  es el voltaje en el tiempo  $t_i$ ,  $R_{ext}$  es la resistencia externa,  $F$  la constante de Faraday (96485 C/mol),  $b$  el número de moles de electrones producidos por una mol de demanda química de oxígeno (DQO),  $S$  la concentración DQO (g/L),  $V$  el volumen del líquido (L), y  $M$  el peso molecular del oxígeno (32g/mol).

Se observan claras diferencias en cuanto al desempeño eléctrico de las MFC's, debido a la gran variedad de factores que incurren en su afectación: la arquitectura, el material de electrodos o el sustrato.

Es por ello, que aunque el potencial máximo teórico sea de aproximadamente 1,1 V; bajo condiciones típicas de temperatura y presión ( $T=293K$ ;  $pH=7$ ,  $p=0,2$  bar); se producen pérdidas que reducen el potencial y hacen que el máximo real medido sea de 0,8 V (Logan, et al., 2006).

Así pues el potencial real ( $E_{real}$ ) de una MFC se calculará como la diferencia entre el voltaje teórico; es decir la diferencia entre el potencial del ánodo y del cátodo; y las pérdidas debidas a:

- Sobrepotencial → Dependen de la corriente y pueden clasificarse por: pérdidas por activación, pérdidas por metabolismo microbiano y pérdidas de concentración. Las pérdidas por activación se producen durante la transferencia de electrones entre los compuestos de reacción y la superficie del electrodo. Las pérdidas por metabolismo microbiano se deben a la diferencia de potenciales entre el sustrato y el aceptor de electrones final.



Finalmente las pérdidas por concentración se producen cuando la tasa de transporte de masa de una especie hacia el electrodo limita la producción (Hoogers, 2003).

- Pérdidas hómicas → Debidas a la resistencia al flujo de electrones a través de los electrodos y las interconexiones (Hoogers, 2003).

Por otro lado, la energía generada por una MFC se expresa como (**ecuación 9**):

$$P = I * E_{real} \quad [9]$$

Por último el parámetro que evaluará el comportamiento eléctrico de la pila será también su resistencia interna, distribuida entre el cátodo, el ánodo y el sistema de transporte de los electrodos (Fan, et al., 2008).

### 3.3.4 CONDICIONES PARA CREAR LA MEJOR EFICIENCIA DE LAS MFC's

Son varios y diferentes los factores que afectan en el rendimiento de las pilas microbianas. La elección de los materiales y su posicionamiento será clave para un funcionamiento eficiente.

- **Material de los electrodos:** Carbono y grafito se utilizan comúnmente como materiales de electrodo en los estudios de MFC ya que ofrecen sostenibilidad a largo plazo debido a su alta conductividad eléctrica y baja resistencia, la naturaleza no oxidativa y el hecho de que ofrecen un buen medio para la fijación y el crecimiento de las comunidades microbianas. Con esto en mente, el grafito es superior al níquel, acero inoxidable, latón, aluminio y cobre como un bioelectrodo (Srikanth et al., 2011).
- **Posición de los electrodos:** La separación entre los electrodos influirá en la resistencia interna de la MFC, dado que afecta a la transferencia de protones entre ellos. Así pues, se reducirá al máximo posible la separación entre ellos para reducir la resistencia interna, teniendo en cuenta donde empieza la zona anaeróbica del humedal. En un reactor de cámara única la densidad de potencia se incrementa alrededor del 60% cuando la distancia se reduce de 4 a 2 centímetros (Liu et al., 2005).

Además, es necesario que el cátodo esté en contacto con el aire ya que la presencia de oxígeno es necesaria para la reacción de reducción en el cátodo. La disponibilidad de oxígeno es directamente proporcional al área del cátodo.

- **Resistencia externa:** Una resistencia externa muy elevada limita el paso de electrones y por tanto la producción eléctrica. La energía será máxima en el momento en que la resistencia externa e interna sean iguales.
- **Carga orgánica:** Mayor carga orgánica dentro del CW-MFC creará un ambiente más reducido provocando mayor diferencia de potencial respecto a la zona superficial.

## 4 MATERIALES Y METODOLOGÍA ADOPTADA

Todos los métodos de análisis utilizados a lo largo de esta tesina han sido realizados y estudiados en humedales contruidos a escala reducida en condiciones de laboratorio.

### 4.1 DISEÑO GENERAL Y SISTEMA DE TRABAJO

El sistema de trabajo consta de 8 humedales subsuperficiales horizontales, alimentados con agua residual por una bomba de captación en la red unitaria y está situado en el edificio D1 de la ETSECCPB.

A continuación se detalla la estructura del sistema de tratamiento instalado en el laboratorio:

- Bomba de captación en la red unitaria y colector para la recogida de aguas residuales urbanas.
- Tratamiento primario por sedimentación en tanque de 0,5 m<sup>3</sup> de capacidad.
- Elevación de 180 litros de agua a tanque para la alimentación de humedales.
- Envío de caudal a la entrada de los humedales por bombas peristálticas (Damova MP-3035-6M) controladas por unidades de frecuencia variable (Toshiba VF-nC3S) para un control preciso de la entrada de agua.
- Tratamiento secundario de depuración con 8 humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal con pilas microbianas incorporadas. (*Figura 4.11.*).
- Depósitos de control del caudal a la salida de cada humedal.

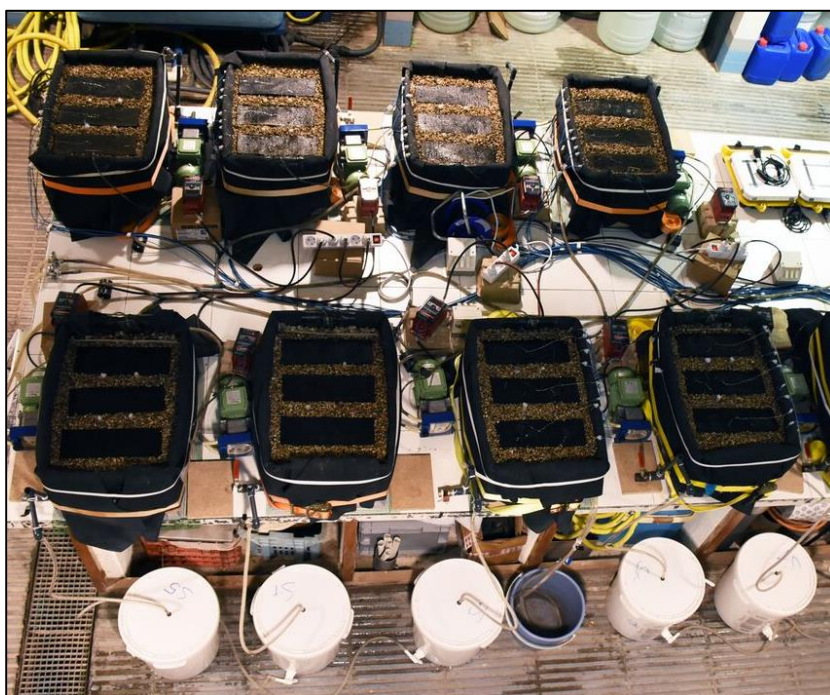


Figura 4.11. Sistemas en el laboratorio del DECA. Fuente: Imagen cedida por el GEMMA

#### 4.1.1 CAPTACIÓN DEL AGUA RESIDUAL HASTA SU ENTRADA EN LOS HUMEDALES

El agua residual que alimenta los humedales, son aguas domésticas mezcladas con el agua de lluvia. Inicialmente, una bomba de captación en la red unitaria del C/Gran Capità; próximo a la universidad; desvía una parte del agua hacía las rejillas de materia gruesa a través del colector. Seguidamente, se recoge el agua en el tanque de reposo con una capacidad total de 0,5 m<sup>3</sup> (54x126x80cm) donde se mantiene el agua durante un mínimo de 3 horas para realizar un tratamiento primario. Este paso es muy importante para disminuir la cantidad de sólidos que pueden colapsar nuestro humedal, eliminando gran parte de partículas superiores a 10<sup>-4</sup> cm de diámetro.

Mediante una bomba subimos a un tanque de menores dimensiones 180 litros de agua sedimentada. Este tanque lleva incorporado un mezclador para que el agua sea lo más homogénea posible en la entrada de los humedales. Con la ayuda de bombas peristálticas (Damova MP-3035-6M) se controla el caudal de entrada en los humedales (**figura 4.10.**).



Figura 4.12. Bomba peristáltica Damova MP-3035-6M utilizada

El agua residual sobrante en el tanque de reposo (**figura 4.11.**) se vierte de nuevo al cauce público mediante la apertura de una válvula situada en la parte inferior del tanque. Debido a la gran concentración de sólidos precipitados se añade agua no residual a la vez que se vierte el agua del tanque para no colapsar los colectores de saneamiento del edificio.





Figura 4.13. Tanque de reposo utilizado en el laboratorio del DECA

#### 4.1.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS

Para la construcción de los humedales se ha utilizado un depósito de PVC de 0.193 m<sup>2</sup> (55x35 cm) relleno con 25 cm de grava *riverine granítica*. El diámetro de la grava de todo el humedal ha sido de entre 4 y 8 mm, salvo para la entrada y alrededor del drenaje de salida que se ha dispuesto de 7 y 14 mm de diámetro con tal de retardar el colapso del lecho granular y facilitar la evacuación en el efluente.

La impermeabilización de los humedales ha sido realizada con una membrana de caucho sintético. Para el control del nivel de agua se ha utilizado una tubería de PVC movable a modo de desagüe con un diámetro interior de 2 cm. La altura máxima de agua contenida en el humedal se consigue colocando totalmente en vertical la tubería, llegando a ser de 25 cm.

Se han colocado 4 puntos de muestreo líquido y 9 de grava en cada sistema. Para el muestreo líquido se han utilizado en el 1º tercio y en el 2º tercio del humedal 2 tubos perforados de  $\varnothing = 1$  cm de plástico, colocados en vertical a 5 cm a la izquierda y a la derecha del centro (**Figura 4.15, I**). Para las muestras de grava se han colocado 3 tubos de plástico perforado de  $\varnothing = 3,2$  cm debajo de cada cátodo, posicionados en el centro y a 8,5 cm a la izquierda y derecha de este. Se han rellenado con una malla “calcetín” que contiene el mismo material granular del sistema. Estas mallas se han ido extrayendo para probar la actividad bacteriana a lo largo de la trayectoria del flujo del humedal (**Figura 4.15, H**).



Tabla 4.5: Dimensiones y elementos del humedal

<b>LARGO (cm)</b>	55
<b>ANCHO (cm)</b>	35
<b>SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)</b>	0,193
<b>VOLUMEN sin grava (m<sup>3</sup>)</b>	0,048
<b>Φ TUBERÍA INTERIOR (cm)</b>	2
<b>POROSIDAD GRAVA (%)</b>	40
<b>GRANULOMETRÍA GRAVA (mm)</b>	4-8
<b>NIVEL GRAVA (cm)</b>	25
<b>NIVEL AGUA (cm)</b>	25

#### 4.1.3 PILAS MICROBIANAS (MFC)

Cada pila microbiana consiste en dos electrodos (ánodo y cátodo) conectados entre ellos por una resistencia externa. En cada humedal se han instalado 3 MFC en serie a lo largo de la trayectoria del flujo (*ver figura 4.15.*).

Cada ánodo consiste en 4 rectángulos de malla de acero inoxidable SS A316L grado marino (*Figura 4.15, C*), dado su alto rendimiento bajo ambientes corrosivos. El ancho total de la malla es de 4,60 mm con un diámetro del alambre de 1 mm. La separación entre ánodos ha sido de 4cm. Cada malla de acero ha cubierto prácticamente la totalidad de la sección transversal (0,08 m<sup>2</sup>) del CW.

El cátodo se compone de una estera de carbono (99% de pureza) de 1,27 cm de espesor con una superficie de 0,03 m<sup>2</sup> (*Figura 4.15, D*). Con el fin de evitar cualquier fuga de oxígeno desde el cátodo hasta el ánodo, se ha colocado una capa de lana de vidrio justo debajo de cada cátodo.

Ambos electrodos han sido conectados externamente por una resistencia de 220 Ω, seleccionada de acuerdo a los resultados de Corbella y Puigagut (2018). El voltaje de cada electrodo a través de la resistencia externa se monitorizó continuamente cada 15 minutos mediante un registrador de datos (Campbell Scientific CR1000, AM16 / 32B Multiplexor).

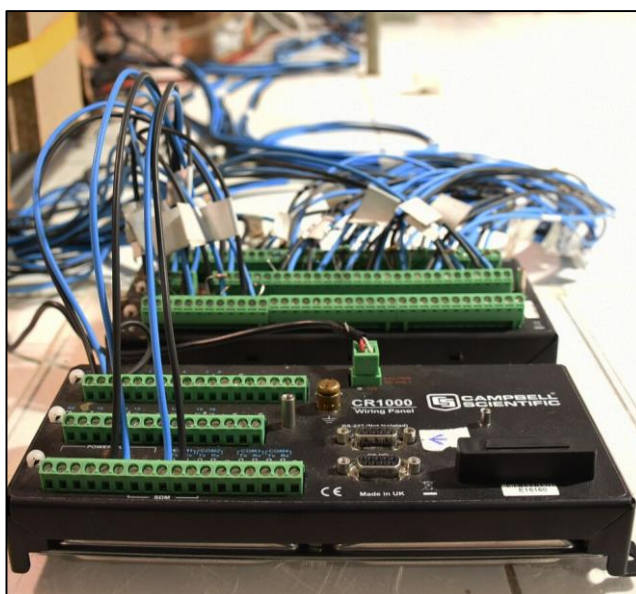


Figura 4.14. Registrador de datos utilizado. Imagen cedida por el GEMMA

El cátodo ha estado en contacto continuo con la atmósfera, proporcionando un medio aeróbico. El ánodo, por el contrario, ha estado a 2 cm por debajo del cátodo, con el fin de estar en un medio anaeróbico a la vez que la separación con el cátodo fuese la mínima.

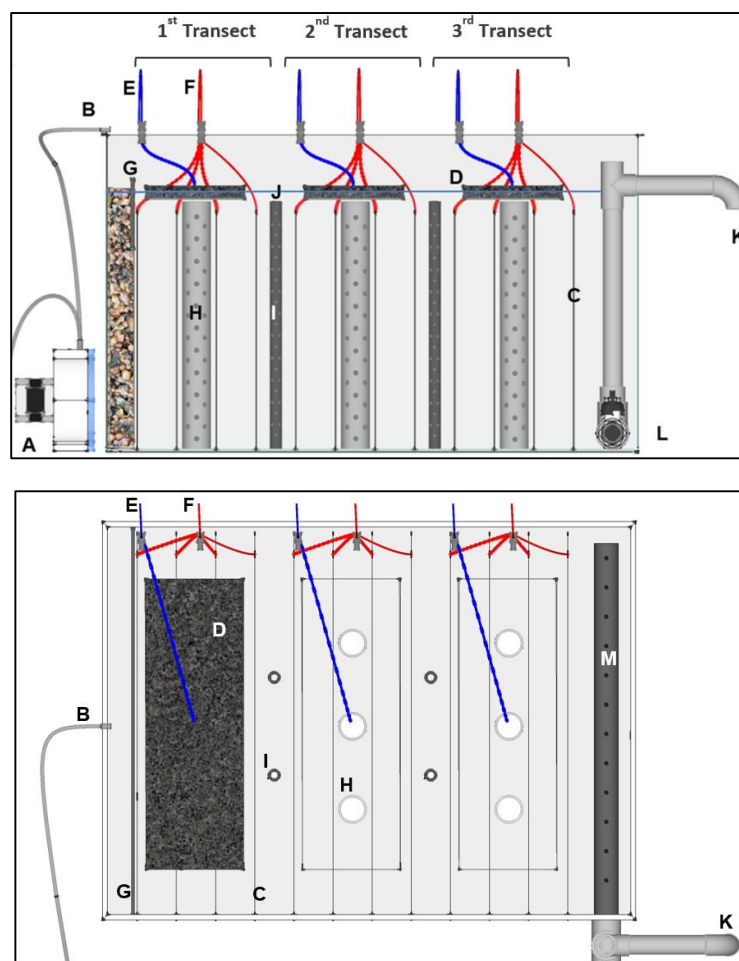


Figura 4.15. Sección (arriba) y vista en planta (abajo) de los sistemas CW-MFC. A: Bomba peristáltica; B: flujo de entrada; C: ánodo; D: catódos; E / F: conexión de ánodo / cátodo al registrador de datos; G: Barrera de flujo lateral para evitar que el agua cree cortocircuitos en la superficie; H: tubos de muestreo de núcleo de grava; I: tubos de muestreo líquido; J: Nivel del agua; K: tubería de efluente; L: Drenaje; M: tubo de recogida de efluente. (Imagen cedida por Dr. Marco Hartl)

## 4.2 CONDICIONES OPERACIONALES

Todos los sistemas han recibido las mismas aguas residuales urbanas a lo largo de todo el periodo de experimentación, 23 semanas dentro del periodo comprendido entre Mayo y Diciembre de 2017 sin contar las pausas de 8 semanas durante el verano y la primera semana de diciembre. 6 semanas antes del inicio de la experimentación se alimentaron los CW-MFC con el fin de establecer la biopelícula (colonias de microorganismos que sirven de soporte a la biodegradación) en los sistemas. Para que la alimentación de los sistemas fuese continua se ha rellenado diariamente el tanque de 180 litros que ha proporcionado a los sistemas una carga hidráulica superficial (CHS) de 26 mm/d mediante las bombas peristálticas, si le aplicamos un promedio de carga orgánica volumétrica (COV) teórica de entrada de  $6,7 \pm 1,4$  g DQO / m<sup>2</sup>·día y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de  $3,8 \pm 0,3$  días. El promedio de agua tratada a la salida de los humedales ha sido alrededor de  $5 \pm 0,5$  L/d con las características comentadas.

Esta tesina se basa en los experimentos de eficiencia de tratamiento realizados a partir de la semana 12, donde: dos sistemas han sido tratados como humedales convencionales (sistemas 4 y 5), dos sistemas como CW-MFC con conexión eléctrica de circuito abierto (sistemas 2 y 3), y otros cuatro sistemas como CW-MFC con conexión eléctrica de circuito cerrado (sistemas 6, 7, 8 y 9).

Dos de los sistemas han trabajado como CW convencionales mediante la eliminación de la malla metálica que formaba el ánodo. Los dos CW-MFC con circuito abierto han trabajado sin la conexión externa de los electrodos, y los otros cuatro humedales han trabajado mediante la conexión de los electrodos a una resistencia externa de la semana 12 a la 23.

## 4.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

A lo largo de todo el estudio experimental, se han llevado a cabo pruebas semanales de las aguas residuales en diferentes puntos de nuestros humedales construidos, para poder caracterizar el agua. El objetivo de estas pruebas es poder determinar las propiedades tanto físicas y químicas, como biológicas de nuestra agua residual.

Los parámetros analizados semanalmente mediante análisis en el laboratorio han sido:

- Sólidos Totales en Suspensión (SST)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Contenido de Amonio (-N amonio)





#### 4.3.1 METOLOGÍA PARA LA TOMA DE MUESTRAS DEL AGUA

La toma de muestras se ha realizado una vez por semana en el mismo momento de realizar los análisis en el laboratorio. Se han determinado 4 puntos de muestreo a lo largo de cada humedal: a la entrada (afluente), a la salida (efluente), a 1/3 y a 2/3 de la longitud del sistema. Para las muestras intermedias se han obtenido recogiendo mediante una jeringa 15 ml de cada tubo de muestreo, obteniendo un total de 60 ml por sistema (4 tubos de muestreo por CW-MFC). De cada tubo se tomaron muestras a los 15 cm y a los 5 cm de profundidad.

Los parámetros de la DQO, DBO<sub>5</sub>, -N amonio, así como sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos en suspensión volátiles (SSV) fueron analizados de acuerdo con los métodos estándar normalizados (APHA-AWWA-WEF, 2005). Parámetros físicos tales como la temperatura de las aguas residuales, el oxígeno disuelto (OD) y el pH se midieron utilizando dispositivos portátiles. Siendo EUTECH, EcoScan DO 6 y CRISON pH / mV - metro 506 los instrumentos utilizados respectivamente.

#### 4.3.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno es el parámetro utilizado para cuantificar la MO presente en el agua residual. Para ello se mide el oxígeno consumido en la oxidación de la MO en una muestra, que la transforma en CO<sub>2</sub> y agua. Se determina digiriendo la MO con un oxidante químico a 150°C durante 2 horas; método conocido como “Colorimétrico”, donde el producto de una reacción química absorbe luz proporcionalmente a su concentración. Sus unidades de medida son mg O<sub>2</sub> equivalente/L.

El material necesario para el ensayo ha sido:

- Agitador magnético e imán
- Vaso de precipitados
- Pipeta aforada de 1-5 ml
- Cubo acondicionador
- Tubos de digestión (numerados del 1 al 35) y gradilla
- Espectrofotómetro
- Bloque digestor
- Matraces aforados
- Agua desionizada
- Matraces aforados

El procedimiento empleado ha sido el siguiente:

- 1) Realización de la recta de calibrado utilizando muestras preparadas con diferentes concentraciones de  $O_2$ .
- 2) Preparación de los tubos de digestión añadiendo en el orden indicado las siguientes concentraciones:

- 2,5 ml de muestra, empezando por las muestras extraídas del efluente. Mediante el imán y el agitador, nos aseguraremos que la muestra es lo más homogénea posible.

- 1,5 ml de solución digestora, Dicromato de Potasio.

- 3,5 ml de solución de ácido sulfúrico.

\* Se han realizado tres blancos (sustituyendo los ml de muestra por tan solo agua desionizada), y dos muestras por cada punto de muestreo.

- 3) Tapar los tubos de digestión e invertirlos 3 veces para homogeneizar la muestra preparada.

- 4) Introducir los tubos en el bloque digestor a  $150^{\circ}C$  y esperar 2 horas.



Figura 4.16. Bloque digestor con control de  $T^a$  y tiempo

- 5) Introducir tubos en la gradilla y dejar enfriar hasta temperatura ambiente (8 minutos en cabina extractora).

- 6) Limpiar cuidadosamente los tubos con alcohol para que las lecturas sean lo más precisas posibles.

- 7) Leer la absorbancia de los tubos ajustando a cero el espectrofotómetro con la muestra blanca. Leer 5 veces cada muestra, girando los tubos  $30^{\circ}$  aproximadamente por cada lectura nueva. De las 5 lecturas se escogerá el valor más bajo.

\*El color de la muestra indica el sobrante de Dicromato que queda en el tubo. Cuando mayor sea el Dicromato sobrante, más se intensificará el color amarillo, y menor será la concentración de MO.

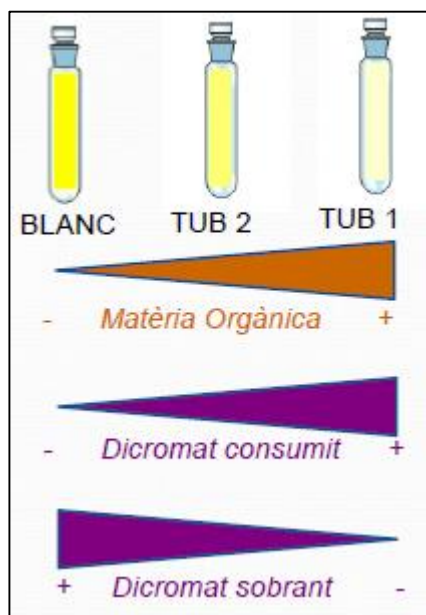


Figura 4.17. Color de muestra según la materia orgánica. Fuente: DEHMA

La DQO, expresada en mg de oxígeno por litro, a partir de la recta de calibración, se calcula mediante la siguiente fórmula (**ecuación 10**):

$$DQO = \left[ \frac{\text{Lectura Absorbancia}}{m} \right] \cdot \frac{Vm}{Valicuota} \quad [10]$$

Dónde:

*m*: Es la pendiente de la recta de calibración.

*Vm*: es el volumen del aforo del matraz durante la dilución de la muestra.

*Valicuota*: Es el volumen de la muestra tomada para ser diluida y utilizada en la determinación colorimétrica.

### 4.3.3 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>)

La demanda bioquímica de oxígeno se utiliza para la medida indirecta de la MO biodegradable. Se observa la cantidad de oxígeno consumido por un cultivo de microorganismos heterótrofos y aerobios que crece sin limitaciones nutricionales, para degradar la MO del agua y transformarla en productos inorgánicos sencillos. Sus unidades de medida son mg O<sub>2</sub>/L.





El material utilizado para el ensayo ha sido:

- Sensor DBO VELP
- Botella de vidrio de 500 ml
- Receptáculo de goma
- Nevera termo regulable
- Agitadores magnéticos
- Hidróxido de sodio
- Espátula
- Probeta

Procedimiento a seguir:

- 1) Filtración de todas las muestras con un filtro de vidrio de 0,47  $\mu\text{m}$ , con el fin de eliminar la materia en suspensión y poder analizar solamente la MO.
- 2) Introducción de las muestras (en nuestro caso: 500 ml en las muestras del efluente, y 250 ml en las de entrada; véase la **tabla 4.6.**) en las botellas junto con el agitador magnético.
- 3) Llenar el receptáculo de goma de cada botella con 6 o 7 (según tamaño) lentejas de hidróxido de sodio ayudándonos de la espátula.
- 4) Cerrar herméticamente cada botella enroscando el sensor VELP y programarlo.
- 5) Introducir botellas en el frigorífico (20°C) y dejar en agitación durante 5 días. La agitación favorece la transferencia de oxígeno entre el espacio de la cabecera y el líquido.
- 6) Leer lectura del sensor VELP

Este método es conocido como “manométrico”. Se basa en la medición de presión de un recinto cerrado al cabo de cinco días. Los microorganismos utilizan el oxígeno presente en la muestra para degradar la MO, produciendo dióxido de carbono. El gas producido es absorbido por el hidróxido de sodio disminuyendo progresivamente la presión interna. La diferencia de presión es registrada por el manómetro del sensor.



Figura 4.18. Botellas con sensor VELP para la medición de DBO

Tabla 4.6: Volumen de muestra a estudiar según la DBO esperada. Fuente: Manual de técnicas analíticas

DBO esperada (mg/L)	Volum de mostra (ml)
0-40	432
0-80	365
0-200	250
0-400	164
0-800	97
0-2000	43,5
0-4000	22,7

#### 4.3.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE AMONIO PRESENTE

El método utilizado para determinar la cantidad de amonio es el conocido como “Azul de indofenol”. Este procedimiento es colorimétrico y mide el amonio existente mediante espectrofotometría. La intensidad del azul de Indofenol es proporcional a la concentración de amoniaco presente en la muestra.

El color característico viene dado de la reacción del Fenol con Monocloramina; formada gracias a la presencia de Nitropruciato de sodio en un medio alcalino; generando Indofenol de azul intenso.

Materiales utilizados para en ensayo:

- 17 matraces de 50 ml
- 17 erlenmeyers de 100 ml rotulados con el nombre de cada muestra
- Pipeta aforada de 1000  $\mu$ l
- Agua desionizada



- Vaso precipitados de 100 ml
- Probeta de 100 ml
- Agitador magnético e imán
- Solución alcalina (pH=12)
- Solución oxidante
- Fenol y etanol
- Espectrofotómetro Genesys 8
- Celda de vidrio

Procedimiento a seguir durante la realización del ensayo:

- 1) Elaboración de la recta patrón usando muestras de concentraciones conocidas de  $\text{N-NH}_4^+$ .
- 2) Filtración de todas las muestras. En nuestro ensayo se ha realizado con filtros de vidrio con un tamaño de poros de  $0,47 \mu\text{m}$ .
- 3) Verter 50 ml de muestra en los Erlenmeyer. Se han realizado tres blancos (sustituyendo los ml de muestra por tan solo agua desionizada), y dos muestras por cada punto de muestreo.
- 4) Crear solución oxidante:
  - Medir 20 ml de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) en probeta e introducir en vaso de precipitados junto con imán
  - Añadir 80 ml de solución alcalina (100 g Citrato de sodio y 5 g hidróxido de sodio en 500 ml de agua desionizada)
- 5) Adicionar sobre la muestra los siguientes volúmenes de reactivos:
  - 2 ml de nitroprusiato de sodio
  - 2 ml de solución alcohólica de Fenol (25g Fenol/250 ml de etanol al 95%)
  - 5 ml de solución oxidante
- 6) Agitar y esperar 1,5 horas para la lectura. Leer la absorbancia a 640 nm para todas las muestras.
- 7) Si el valor de la absorbancia queda fuera del rango válido (entre 0 y 1 ppm  $\text{N-NH}_4^+$ ), será necesario diluir la muestra.

\*En esta tesina todas las muestras de entrada y salida han sido diluidas 1:100 y 1:50 respectivamente.



Figura 4.19. Espectrofotómetro GENSYS 8 utilizado

Para calcular la concentración de amonio ( $N - NH_4^+$ ) de las muestras se utiliza la siguiente expresión (**ecuación 11**):

$$N - NH_4^+ = \left[ \frac{\text{Lectura Absorbancia}}{m} \right] \cdot \frac{Vm}{Valicuota} \quad [11]$$

Dónde:

$m$ : Es la pendiente de la recta de calibración.

$Vm$ : es el volumen del aforo del matraz durante la dilución de la muestra.

$Valicuota$ : Es el volumen de la muestra tomada para ser diluida y utilizada en la determinación colorimétrica.

#### 4.3.5 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN

Los sólidos totales en suspensión (SST) son el material retenido sobre un filtro estándar después de la filtración de una muestra bien mezclada de agua. Estos sólidos son secados a 103-105 °C.

Equipo utilizado para el ensayo:

- Filtro Millipore
- Equipo de filtración
- Estufa de secado
- Balanza analítica (+/- 0.0001 g)

Procedimiento a seguir para la obtención de los SST:

- 1) Previamente al ensayo, se limpian los filtros de tamaño de poros de 0,47  $\mu m$  a utilizar introduciéndolos a 105 °C durante 2 horas en la estufa.
- 2) Filtrar la muestra de volumen conocido. La materia en suspensión queda adherida al filtro.
- 3) Secar en la estufa durante 2 horas o más.
- 4) Pesar en la balanza de precisión y restarle el peso propio del filtro.

El contenido de sólidos suspendidos totales se calcula como (**ecuación 12**):

$$SST \text{ en mg/l} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{ml (muestra)}} \quad [12]$$

Siendo: A= Peso del filtro + residuo (g) y B= Peso del filtro (g)

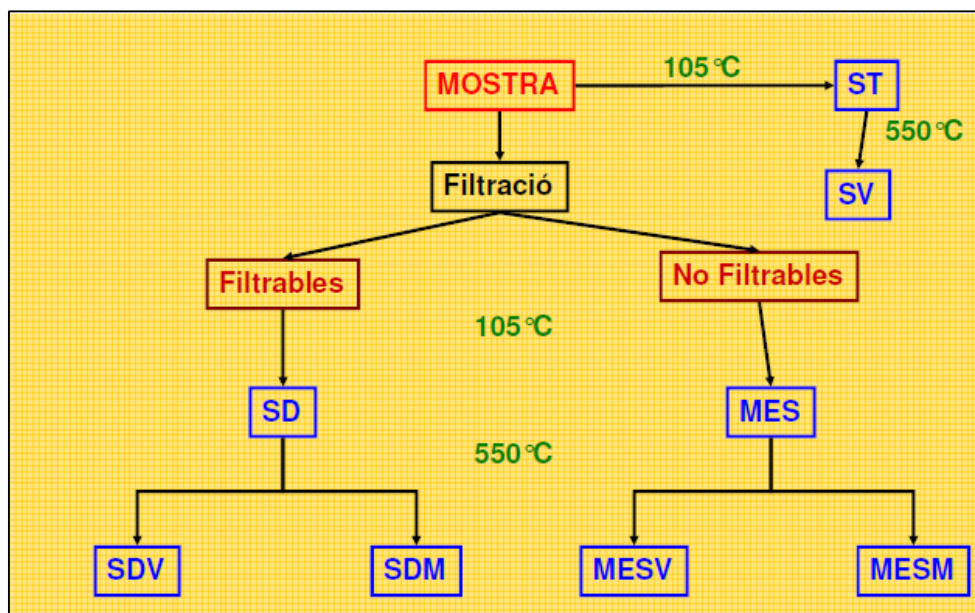


Figura 4.20. Esquema general de la materia sólida (DEHMA)



Figura 4.21. Estufa (105°C)

#### 4.3.6 RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DEL SISTEMA

Un rendimiento nos puede dar información del correcto funcionamiento del humedal y de la pila. Este parámetro debe hallarse para cada uno de los compuestos analizados. Para dicho cálculo se utiliza la siguiente expresión (**ecuación 13**):

$$\rho(\%) = \left( 100 - \left( \frac{\text{Cantidad eliminada} \left( \frac{g}{\text{día}} \right)}{\text{Cantidad existente en la entrada} \left( \frac{g}{\text{día}} \right)} \right) \right) \cdot 100 \quad [13]$$





## 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las distintas pruebas que definen los objetivos de la presente tesina.

### 5.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE EL RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN

Para determinar el efecto de la conectividad de las pilas en la depuración de agua, se comprueba su comportamiento de degradación de MO, Amonio y SST a lo largo de los sistemas.

Como se ha comentado en el “apartado 4”, se dispone de 3 tipologías de sistemas:

- **CW**: Humedal convencional (Sin pila microbiana incorporada) → Sistemas 4 y 5
- **CW-MFC (OC)**: Humedal con pila microbiana incorporada NO activa → Sistemas 2 y 3
- **CW-MFC (CC)**: Humedal con pila microbiana incorporada activa → Sistemas 6, 7, 8 y 9

Todos los resultados obtenidos son los promedios entre los sistemas de la misma tipología.

#### 5.1.1 %ELIMINACIÓN MO

Para averiguar la eliminación de materia orgánica de cada sistema se ha analizado la DQO Total una vez por semana. En el cálculo se han utilizado 4 puntos de muestreo (afluente, 1/3, 2/3 y efluente) a lo largo del sistema. Para ello se utiliza la **ecuación 14**:

$$\%MO\ eliminada = \left(100 - \frac{(DQO_{punto1} - DQO_{punto2})}{DQO_{punto1}}\right) \cdot 100 \quad [14]$$

Donde:

$DQO_{punto1}$  = Promedio de DQO ( $g/m^2 \cdot d$ ) de las duplicidades en el punto de entrada que queremos estudiar.

$DQO_{punto2}$  = Promedio de DQO ( $g/m^2 \cdot d$ ) de las duplicidades en el punto de salida que queremos estudiar.

Si se hace el promedio de eliminación para cada tipo de sistema, se obtiene la **figura 5.22**:

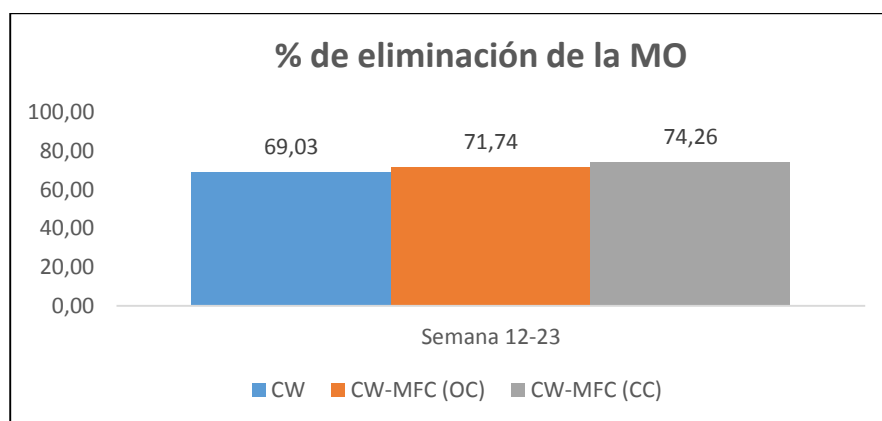


Figura 5.22. % de eliminación de la MO en función del tipo de sistema

Se puede comparar la DQO ( $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ ) entre los puntos de muestreo para saber la cantidad de MO degradada entre ellos. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor habrá sido la MO degradada.

El *1r tercio* es la diferencia de DQO entre el afluente y el primer punto de muestreo, el *2º tercio* la diferencia entre el primer punto de muestreo y el segundo, y el *efluente* la diferencia entre el segundo punto de muestreo y la salida (**figura 5.23**).

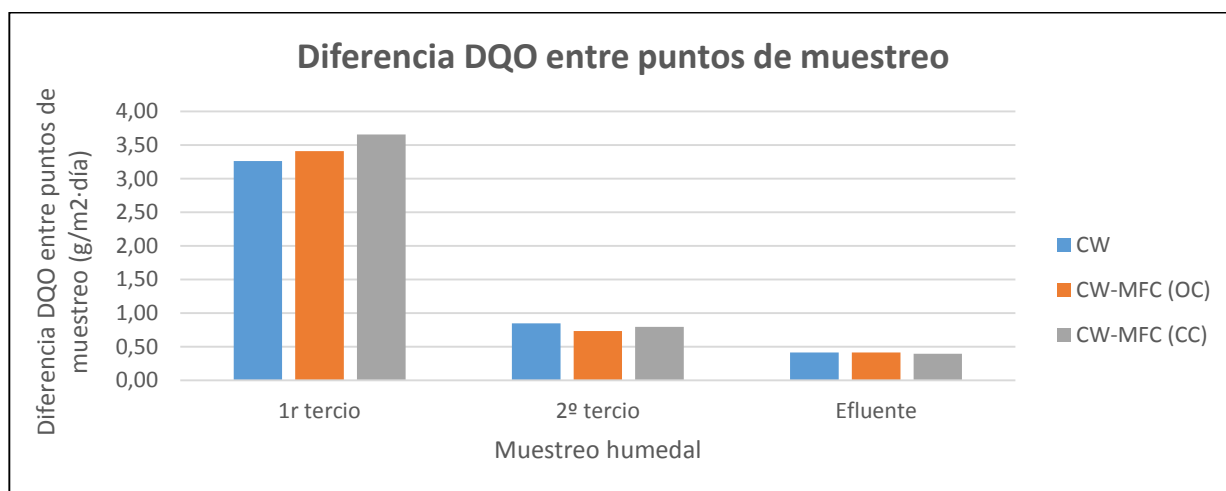


Figura 5.23. Diferencia de DQO entre los puntos de muestreo

Es coherente que a lo largo del humedal vaya disminuyendo la cantidad de MO degradada dado que cada vez hay menos cantidad, pero podría ser que a pesar de haber degradado menos cantidad de MO se tenga el mismo % de eliminación (**figura 5.24**).

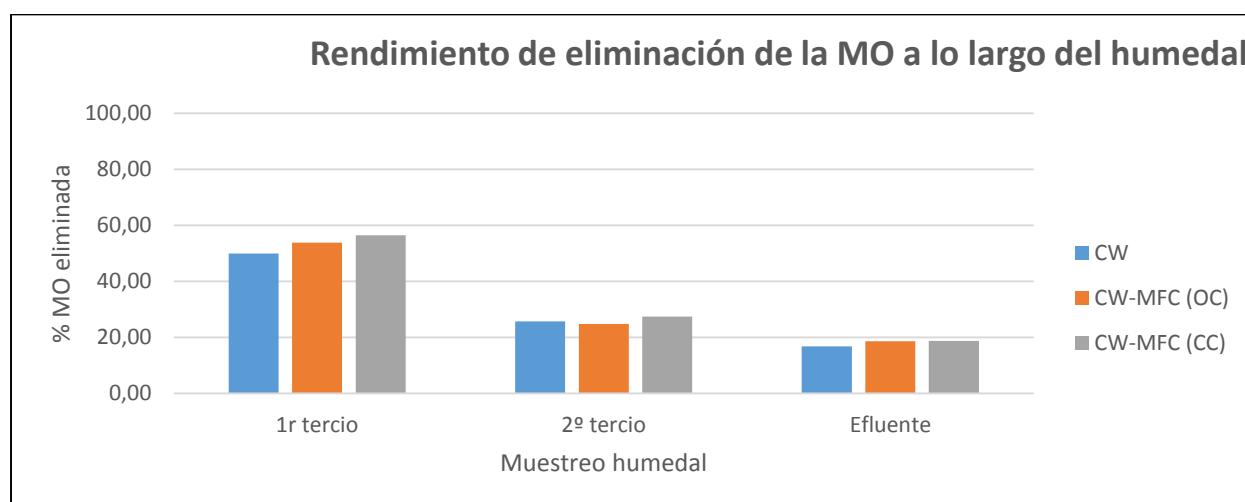


Figura 5.24. Rendimiento de eliminación de la MO entre los puntos de muestreo

Como puede verse, la zona con mayor porcentaje de eliminación se da en el 1r tercio del humedal. Así pues, se escoge esta zona como la más representativa dado que a partir de aquí los resultados son muy semejantes entre los sistemas.

También podemos analizar el % de eliminación de MO a lo largo de las semanas (**figura 5.25**).

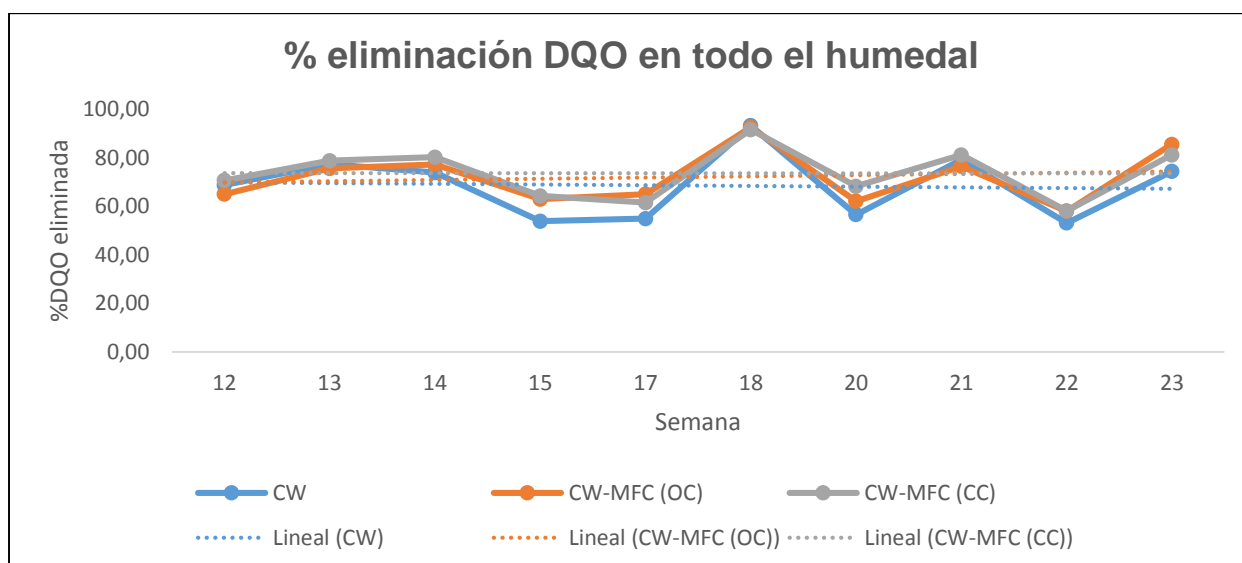


Figura 5.25. % de eliminación a lo largo de las semanas

### 5.1.2 % ELIMINACIÓN AMONIO

Mediante el método "Colorimétrico" explicado en el apartado 4, se presentan los resultados obtenidos en la determinación del amonio mediante la **ecuación 15**:

$$\% \text{Amonio eliminado} = \left( 100 - \frac{(N-NH_4^{+punto1} - N-NH_4^{+punto2})}{N-NH_4^{+punto1}} \right) \cdot 100 \quad [15]$$

Donde:

$N-NH_4^{+punto1}$  = Promedio de Amonio ( $g/m^2 \cdot d$ ) de las duplicidades en el punto de entrada que queremos estudiar.

$N-NH_4^{+punto2}$  = Promedio de Amonio ( $g/m^2 \cdot d$ ) de las duplicidades en el punto de salida que queremos estudiar.

Si se hace el promedio de eliminación para cada tipo de sistema, obtenemos la **figura 5.26**:

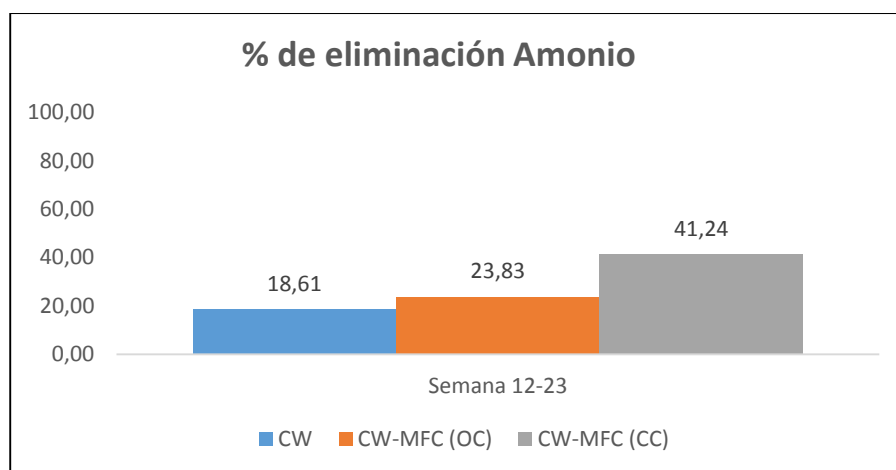


Figura 5.26. % de eliminación del amonio en función del tipo de sistema

Se puede comparar el amonio ( $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ ) entre los puntos de muestreo para saber si la degradación del amonio es continua a lo largo del humedal o existen puntos de mayor eliminación.

Al igual que en el apartado anterior, el *1r tercio* es la diferencia entre el afluente y el primer punto de muestreo, el *2º tercio* la diferencia entre el primer punto de muestreo y el segundo, y el *efluente* la diferencia entre el segundo punto de muestreo y la salida (**figura 5.27**).

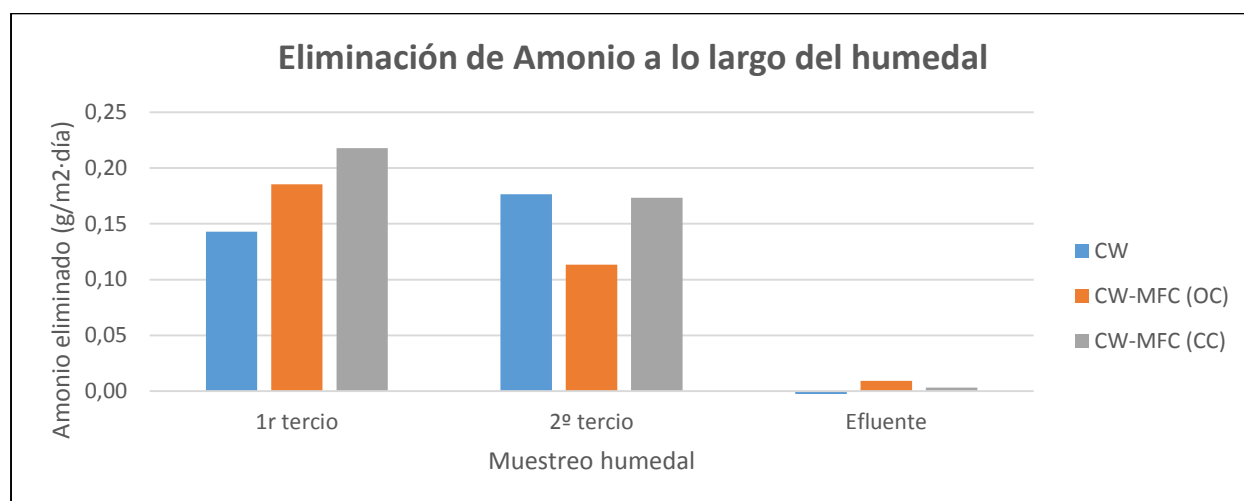


Figura 5.27. Amonio eliminado entre los puntos de muestreo

Es coherente que a lo largo del humedal vaya disminuyendo la cantidad de Amonio degradado dado que cada vez hay menos cantidad, pero podría ser que a pesar de haber degradado menos cantidad de Amonio se tenga el mismo % de eliminación (**figura 5.28**).

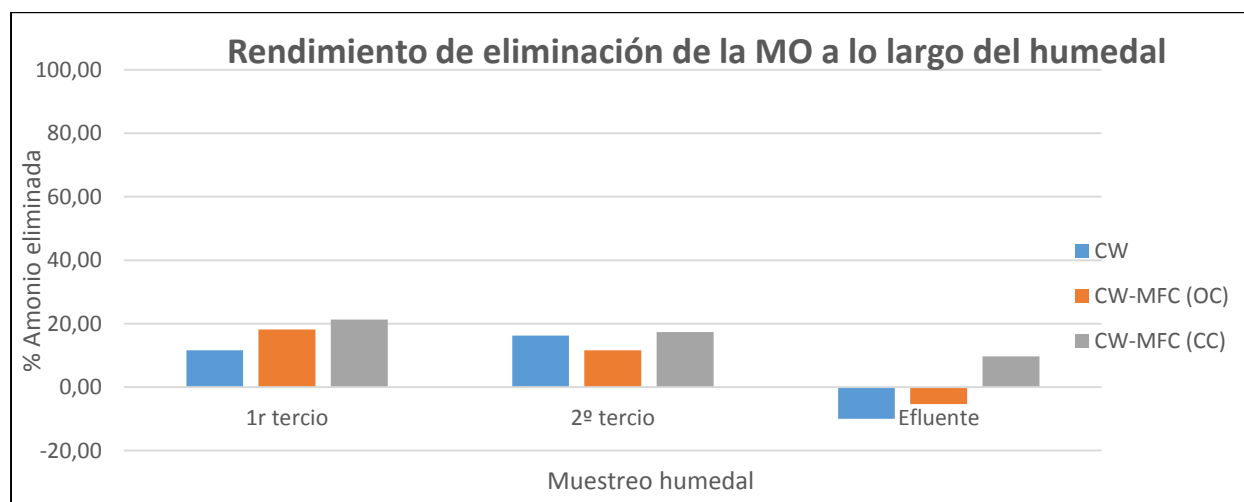


Figura 5.28. Amonio eliminado entre los puntos de muestreo

Como puede verse, la zona con mayor porcentaje de eliminación y con resultados característicos se da en el 1r tercio del humedal. Así pues, se escoge esta zona como la más representativa dado que a partir de aquí los resultados son demasiado variantes, dando incluso porcentajes de eliminación negativos en alguno de ellos. Esta casuística se comenta más adelante.

También se puede analizar el % de eliminación de Amonio a lo largo de las semanas (**figura 5.29**).

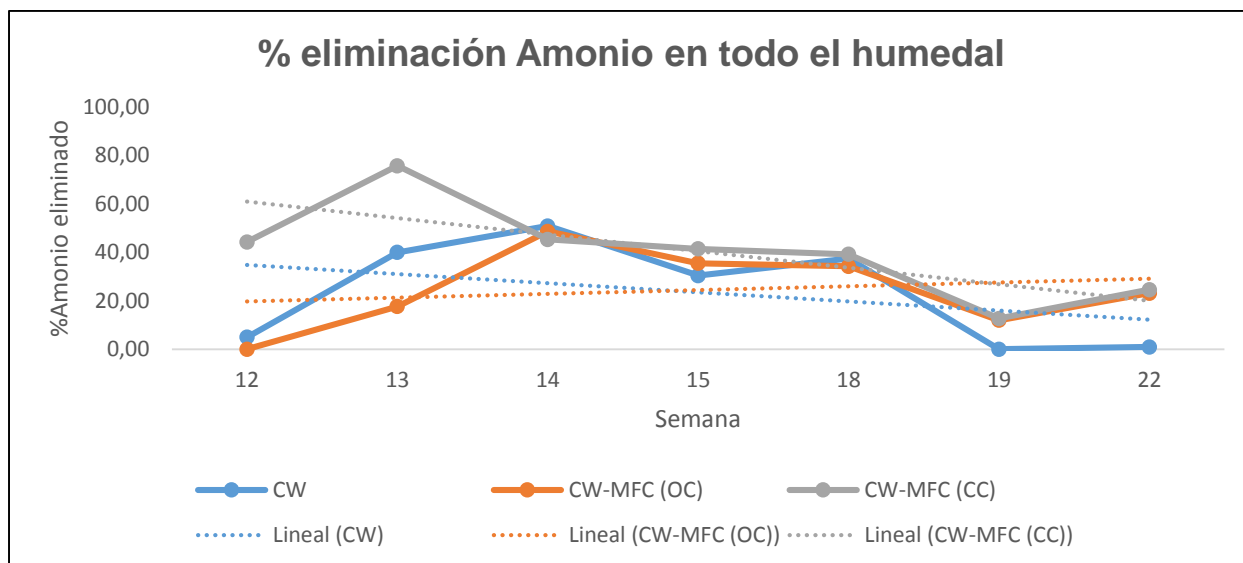


Figura 5.29. Amonio eliminado a lo largo de las semanas

El amonio a la entrada de los sistemas ha sido muy variante a lo largo del experimento. Los días de lluvia, como es de esperar, el amonio se diluye y da lugar a concentraciones más bajas. Se ha de comentar que los datos de entrada y salida de los humedales se han tomado el mismo día de la semana. Sin embargo, el tiempo de retención hidráulico del humedal es de 4 días. Por tanto la comparación no llega a ser del todo precisa y por ello que si se comparan los resultados obtenidos a lo largo de las semanas se observan valores muy dispares.

### 5.1.3 %ELIMINACIÓN DE SST

Utilizando la **ecuación 12** (véase apartado 4) se calculan los sólidos totales contenidos a la salida de los sistemas:

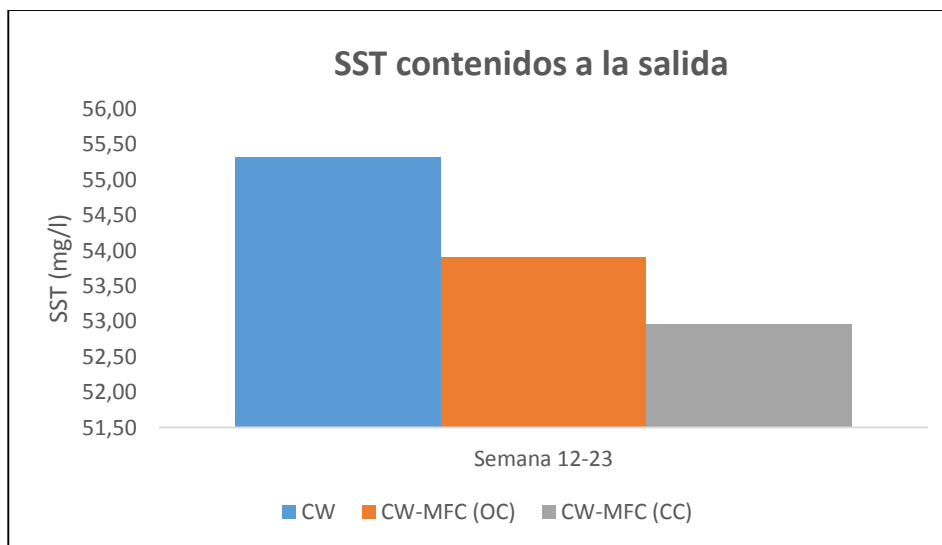


Figura 5.30. SST a la salida de los sistemas

## 5.2 EFICIENCIA COULOMBICA

Se evalúa la eficiencia coulombica a lo largo de las semanas para estudiar la durabilidad de las pilas en el tiempo.

Para el cálculo de la eficiencia coulombica de las MFC (CC) se hace uso de la **ecuación 8** (véase apartado 4):

$$EC\% = \frac{E_{Pila,i} * t_i}{R_{ext} * F * b * S * V} * M * 100 \quad [8]$$

Donde,  $E_{Pila,i}$  es el voltaje en el tiempo  $t_i$ ,  $R_{ext}$  es la resistencia externa,  $F$  la constante de Faraday (96485 C/mol),  $b$  (4) el número de moles de electrones producidos por una mol de demanda química de oxígeno (DQO),  $S$  la concentración DQO (g/L),  $V$  el volumen del líquido (L), y  $M$  el peso molecular del oxígeno (32g/mol).

La eficiencia se analiza en función de la resistencia externa que le hemos aplicado de 220  $\Omega$ .

Para ello, se han llevado a cabo dos seguimientos:

- Medición de la producción eléctrica tomando datos del voltaje cada 15 minutos mediante el registrador de datos. Con este seguimiento determinamos la intensidad que circula en las pilas por unidad de tiempo.
- Toma de muestras semanales para la determinación de MO eliminada en los sistemas mediante la realización de la DQO en los 4 puntos de muestreo de los humedales.

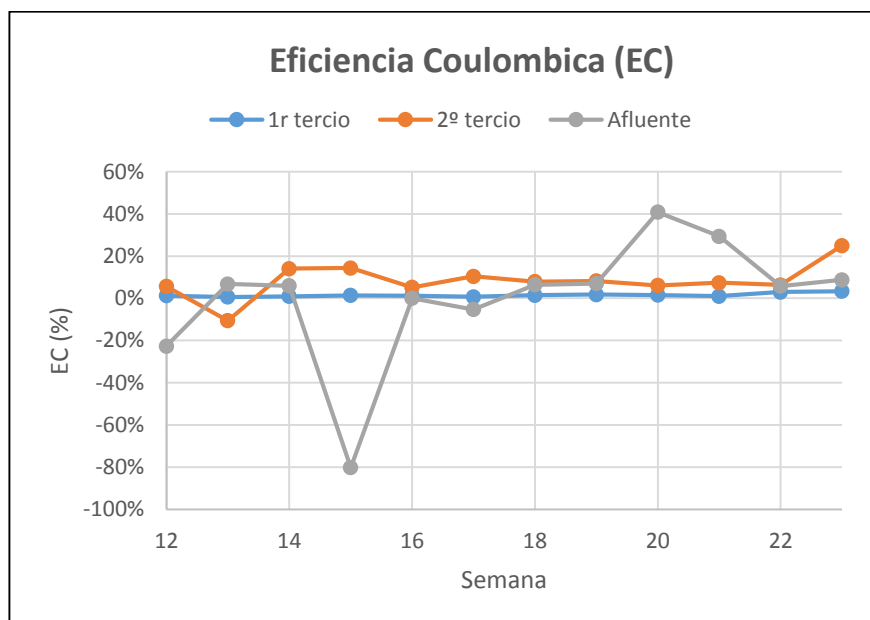


Figura 5.31. Eficiencia Coulombica a lo largo de las semanas de las MFC (CC)

Como se puede observar los resultados con mayor fiabilidad y de donde se pueden extraer las conclusiones se dan en el 1r tercio del humedal, siendo la EC constante a lo largo de las semanas y con valores del 2-5%.



### 5.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A partir del voltaje y la resistencia externa incorporada se puede medir la intensidad de corriente de las pilas y la energía generada.

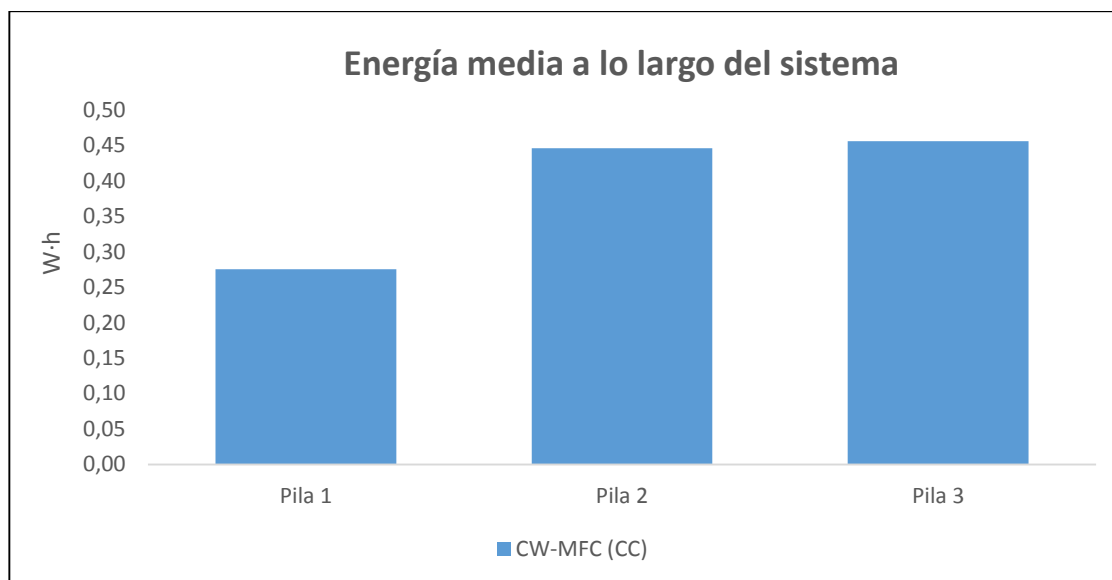


Figura 5.32. Energía generada (W·h) mediante la depuración de agua



## 6 CONCLUSIONES

Se puede concluir que la eficiencia de tratamiento del agua residual es mayor cuando un humedal artificial opera como sistema bioelectroquímico, objetivo principal de esta tesina. Esto supone la reducción de la superficie necesaria para la depuración de agua, uno de los grandes inconvenientes de los sistemas naturales.

### 6.1 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 1 DEL ESTUDIO

#### 6.1.1 %ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Mediante el estudio de la DQO se ha determinado la degradación de materia orgánica de cada sistema. La **figura 5.22** (véase apartado 5) muestra que la implantación de pilas microbianas en humedales incrementa la degradación de MO, eliminando prácticamente el 75%.

Si se analiza la eliminación a lo largo del humedal se obtiene los resultados presentados a continuación.

- **Eliminación de la MO en todo el sistema (afluente – efluente):**
  - Incorporar una pila microbiana no activa a un humedal, supone una mejora del 1,1% en la eliminación de la MO.
  - Las pilas conectadas eliminan un 7,1% más de MO que las no conectadas.
  - Incorporar una pila microbiana activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del 8,1%.
- **Eliminación de la MO en el 1/3 del sistema (afluente – 1r punto de muestreo):**
  - Incorporar una pila microbiana no activa a un humedal, supone una mejora del 4,4% en la eliminación de la MO.
  - Las pilas conectadas eliminan un 6,8% más de MO que las no conectadas.
  - Incorporar una pila microbiana activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del 10,8%.
- **Eliminación de la MO en el 2/3 y efluente del sistema:**

A partir del 1r tercio del sistema, la degradación de la MO es semejante en los tres sistemas (**figura 5.24**, véase apartado 5). Esto es debido a que el agua tiene una tendencia de flujo que la hace fluir por donde hay menos rozamiento. Al tener el efluente a un lado del sistema, el agua tiende a irse hacia la pared del humedal, dando mayores velocidades en esta zona y por lo tanto siendo el tiempo de retención hidráulico menor. Esto provoca que a partir del 1r tercio del humedal, la depuración del agua sea menor y por lo tanto su porcentaje de eliminación sea más bajo. Además, debido a que el agua no fluye de la misma manera por todo el humedal, en las zonas donde el agua tiene menor velocidad se acumula mayor materia orgánica provocando que la extracción de algunas muestras en estos puntos no sea representativa.

Si se observa la **figura 5.33** puede verse la tendencia de flujo del agua de forma exagerada para un mayor entendimiento de la casuística.

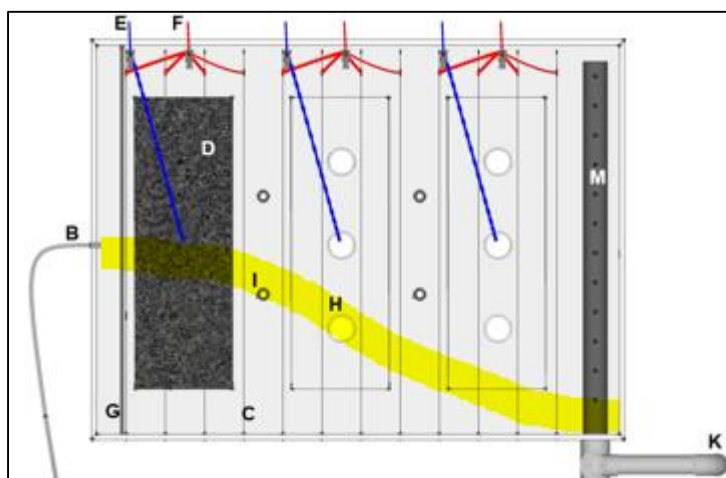


Figura 5.33. Tendencia de flujo del agua

### 6.1.2 % ELIMINACIÓN DE AMONIO

Mediante el estudio del contenido de amonio se ha determinado la degradación del amonio de cada sistema. La **figura 5.26** (véase apartado 5) muestra que la implantación de pilas microbianas en humedales incrementa la degradación de Amonio, eliminando prácticamente el 42%.

Los porcentajes de eliminación en amonio suelen ser más bajos que los de MO dado que en humedales horizontales subsuperficiales no se dispone mucha zona aerobia y por lo tanto la transferencia de oxígeno es baja, haciendo difícil la eliminación de amonio.

- **Eliminación de amonio en todo el sistema (afluente – efluente):**
  - Incorporar una pila microbiana no activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del amonio del 1,4%.
  - Las pilas conectadas eliminan un 47,1% más de amonio que las no conectadas.
  - Incorporar una pila microbiana activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del 47,9%.
- **Eliminación de amonio en el 1/3 del sistema (afluente – 1º punto de muestreo):**
  - Incorporar una pila microbiana no activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del amonio del 22,9%.
  - Las pilas conectadas eliminan un 15% más de amonio que las no conectadas.
  - Incorporar una pila microbiana activa a un humedal, supone una mejora de eliminación del 34,4%.
- **Eliminación de amonio en el 2/3 y efluente del sistema:**



Como ya se ha comentado, los resultados a partir del 1r tercio del humedal pierden fiabilidad a causa de la tendencia de flujo del agua. En el caso de la eliminación del amonio en algunos casos produce porcentajes de eliminación negativos debido a que el amonio retenido en las zonas con menor velocidad de agua producen que la extracción de muestras a partir del 1r tercio del humedal no sean del todo representativas (**figura 5.28**, véase apartado 5).

### 6.1.3 % ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

Se han analizado el contenido de sólidos totales a la salida de los sistemas. Como puede observarse en la **figura 5.30** la implantación de pilas microbianas en humedales incrementa la eliminación de SST, llegando a tener casi el 5% menos que un humedal convencional.

## 6.2 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 2 DEL ESTUDIO

Para comprobar la durabilidad en el tiempo se ha estudiado la eficiencia coulombica de las pilas microbianas a lo largo de las semanas. Si se observa la **figura 5.31** (véase apartado 5) se puede concluir que los resultados más característicos son los representados en el 1r tercio del humedal, dado que su variación a lo largo de las semanas es prácticamente constante. Con ello se puede afirmar, que la eficiencia de las pilas microbianas no se ve afectada por el tiempo ni tienden a degradarse.

Para corroborar esta afirmación se pueden analizar la **figura 5.25** (véase apartado 5), donde se observa que la eliminación de la MO a lo largo de las semanas no baja del 50%. Además, su línea de tendencia incluso tiende a una ligera mejora a lo largo del tiempo debido a la madurez de los microorganismos.

## 6.3 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS ACERCA DEL OBJETIVO 3 DEL ESTUDIO

Una de las cuestiones principales por las que se ha realizado esta tesina, es para analizar cuanta energía eléctrica es capaz de generar una pila microbiana mediante la depuración de agua.

Mediante el voltaje medio de las tres pilas y la intensidad se ha calculado la energía; siendo 0,4 V y 1,6 mA respectivamente. Si sumamos la producción que generan las tres pilas implantadas en los sistemas nos da una energía eléctrica media de 2,14 W·h, o lo que es lo mismo, 51,5 W·día mediante la depuración de 5,2 L/día.



## 7 RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos indican que la utilización de pilas microbianas en humedales construidos supone una mejora en el tratamiento de aguas. Esto ayuda a reducir la superficie necesaria para el tratamiento y en consecuencia disminuye los costes económicos. Es por ello, que sería de gran ayuda comprobar que los resultados obtenidos a escala en el laboratorio se confirman a gran escala.

Además, dado que se ha comprobado que las CW-MFC conectadas depuran una mayor cantidad de agua se podría estudiar la posibilidad de incorporar un potencióstato al sistema y comprobar si supone una mejora en el tratamiento incorporando un mínimo de energía.

También sería interesante poder realizar este mismo estudio incorporando plantas al humedal, nos acercaría más a la realidad de los humedales naturales y podríamos extraer conclusiones más reales.

Por último, sería recomendable estudiar el almacenamiento de la energía generada para poder ser utilizada. Esto supondría un gran avance en las energías renovables.



## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A., Esteve, A., Salas, J. & Berná, A. (2016). Microbial Electrochemical Systems outperform fixed-bed biofilters for cleaning-up urban wastewater. *Electronic Supplementary Material (ESI) for environmental Science: Water Research & Technology*, 3-8.
- Álvarez, J. (2003). Tratamiento anaerobio de aguas residuales en planta piloto. *Departamento de química y física la universidad de La Coruña. Ecol. Eng.* 33 (1), 119-128.
- Alvarez, J. a, Ruíz, I., Soto, M., (2008). Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 33 (1), 54e67.
- Benito, J., et. al. (2001). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos. *Instituto de investigaciones marinas y costeras*, 21-95.
- Borole, A. P., Hamilton, C. Y., Vishnivetskaya, T., Leak D. & Andras C. (2009). Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms inflow-through systems. *Biochemical Engineering Journal: 48 (1)*, 71-80.
- Calvo, L. (2001). Programa de actividades I+D en tecnologías entre grupos de investigación de la Comunidad de Madrid. Red Madrileña de Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales (S2013/MAE-2716 REMTAVARES-CM), 16-50.
- Corbella, C. Guivernau, M., Viñas, M. & Puigagut, J. (2015). Operational, design and microbial aspects related to power production with microbial fuel cells implemented in constructed wetlands. *Water research* 84, 232-242.
- Corbella, C., Garfí, M. & Puigagut, J. (2016). Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 563-564, 448-455.
- Criado, M., Fajardo, S., Valdez, B. & Bastidas JM. (2013). Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad. *En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience; pp. 11-32.*
- Doherty, L., Zhao, Y. Hu, Y. & Hao, X. (2016). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland-Microbial fuel cells. *Water research* 85, 38-45.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances: 25 (5)*, 464-482.
- Espigares, M. & Pérez, J. (1985). Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. *Universidad de granada. Servicio de Publicaciones*, 8-22.
- Fan Y., Sharbrough E., & Liu H. (2008). Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology: 42 (21)*, 8101-8107.
- García, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos: Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. *Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental: Universitat Politècnica de Catalunya*, 7-22.





- Hernández, F., Pérez, A., Larrosa, A., Sánchez, S., Lozano, L. & Godínez, C. (2013) Montaje y estudio de una pila de combustible microbiana para la producción de electricidad con depuración simultánea de aguas residuales. *Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena. Servicio de Publicaciones*, 1-5.
- Li, W-W., Shen, G., Liu, X., & Yu, H. (2011). Recent advances in the separators for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*: 102 (1), 244-252.
- Liu, H. & Logan, B. (2004). Electricity generation using an aircathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science Technology*: 38 (14), 4040–4046.
- Logan, B. & Rabaey, K. (2012). Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies. *Science*, Issue 337, pp. 686-690.
- Logan, B., et al. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*: 40 (17), 5181-5192.
- Min, B., Cheng, S., & Logan, B. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*: 39 (9), 1675 – 1686.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*: 101 (6), 1533-1543.
- Pérez, L. (2005). Teoría de la sedimentación. *Cátedra de hidráulica aplacada la ingeniería sanitaria. Área de hidráulica*, 2-14.
- Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013) Microbial fuel cells: A challenge for the removal of organic matter and electricity generation. *Universidad de Nariño (Colombia). Servicio de Publicaciones*, 1-12.
- Richert, A., Gensch, R., Jönsson H., Stenström, T. & Dagerskog, L. (2012). Guía práctica de Uso de la Orina en la producción agrícola. Stockholm Environment Institute. EcoSanRes series, 36-72.
- Rismani-Yazdy, H. et al. (2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. *Bioresource Technology*: 102 (1), 278–283.
- Salar, M., Ortiz, V., de los Ríos, A., Hernández, F., Sánchez, S. & Lozano, L. (2014) Pilas de combustible microbianas: Factores clave para su diseño. *Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones*, 1-11.
- Wang, Y., Zhao, Y., Xu, L., Wang, W., Doherty, L., Tang, C., Ren, B. & Zhao, J. (2017) Constructed wetland integrated microbial fuel cell system: looking back, moving forward. *Water Science & Technology*, 1-7.
- Sandía, J., (2013) Celdas de Combustible Microbianas. *Prezi* 1-6.



## **BIBLIOGRAFÍA SUPLEMENTARIA NO CITADA**

Aguirre, A., Bacchetti, T., Aragón, C., Esteve, A., Salas, J. & Berná, A. (2016). Microbial Electrochemical Systems outperform fixed-bed biofilters in cleaning-up urban wastewater. *Electronic Supplementary Material (ESI) for enviromental Science: Water Research & Technology*, 984-991.

García, J. (2004). *Constructed wetlands for pollution control: perspective on a technology in expansion*. Barcelona, España: Ediciones CPET.

Hoogers, A., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2003). Microbial fuel cells: novel techonology for energy generation. *Trends in Biothechnology*, 23(6), 291-298.

Tracking Biofilms Using an Electrochemical Quartz Crystal Microbalance (2016). *Gamry Instruments*, 1-4.

<http://acercandolabiofisica.blogspot.com.es/2009/10/capacitancia-de-la-membrana-bajo-un.html>

<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

[http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales\\_didacticos/consumoelectrico/consumoelectrico.html](http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/consumoelectrico/consumoelectrico.html)

<http://www.quimicadelagua.com/Otros.Solidos.html>

<https://prezi.com/qslfg5ewm0ih/calculo-de-la-carga-organica/>

<https://www.edumedia-sciences.com/es/media/657-potencia-y-energia-electrica>

<https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-prospects-2017.html>



## **ANEJO 1. PARÁMETROS FÍSICOS ESTUDIADOS PARA EL CONTROL Y BUEN FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS**



Fecha	Parámetros	Afluente (3 cm por debajo de la superficie)								Efluente							
		2	3	4	5	6	7	8	9	2	3	4	5	6	7	8	9
Semana 12 28/09/2017	Temperatura (C°)	25.3	25.8	25.8	25.1	26.1	25.1	26.3	26.1		24.4	24.7		24.8	24.3	24.7	24.8
	Oxígeno Disuelto (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0		3.36	3.75		4.03	4.24	4.35	4.88
	pH (-)	7.71	7.76	7.61	7.67	7.55	7.56	7.59	7.56		8.04	7.87		7.84	7.77	8.04	8.08
Semana 13 05/10/2017	Temperatura (C°)	25.7	25.3	25.9	25.2	24.9	25.2	26.6	25.8	23.4	23.4	23.6	23.6	23.3	23.5	23.5	23.7
	Oxígeno Disuelto (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0	3.07	3.79	4.02	4.22	3.59	3.75	3.78	3.76
	pH (-)	7.56	7.86	8.09	8.08	7.96	7.69	7.93	7.58	7.56	7.86	8.09	8.08	7.96	7.69	7.93	7.58
Semana 17 02/11/17	Temperatura (C°)																
	Oxígeno Disuelto (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0	6.42	5.52	5.42	5.40	5.56	5.7	6.19	5.30
	pH (-)																

\* En los puntos intermedios del humedal el OD también es nulo.